



## **Bewertung von Resilienz im Schienenverkehr**

Evnika Grass

(Matrikelnummer: 70349540)

Eingereichte Abschlussarbeit

zur Erlangung des Grades

**Master of Arts**

im Studiengang

Verkehr und Logistik

an der

Karl-Scharfenberg-Fakultät

der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften

Erster Prüfer:

Prof.-Dr.-Ing. Wolf-Rüdiger Runge

Zweiter Prüfer:

Dipl.-Wirtsch.-Ing. (FH) Benedikt Scheier M. Sc.

Eingereicht am:

16.11.2018

# Inhalt

<b>Inhalt .....</b>	<b>II</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>IV</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Vorstellung der Ausgangssituation .....	1
1.2 Motivation und Problemstellung .....	2
1.3 Zielsetzung und Vorgehen .....	3
<b>2 Resilienz.....</b>	<b>4</b>
2.1 Betrachtungsraum.....	4
2.2 Warum ist Resilienz so wichtig?.....	4
2.2.1 Ist das klassische Störfallmanagement nicht die Lösung?.....	5
2.2.2 Welche Störungen sind für diese Ausarbeitung interessant?.....	7
2.2.3 Hochwasser im Juni 2013 .....	10
2.2.4 Stürme „Xavier“, „Herwart“ und „Friederike“ .....	11
2.3 Bedeutung und Einordnung des Begriffs Resilienz im Schienenverkehr .....	12
2.3.1 Resilienz in anderen Disziplinen - der Grundgedanke .....	12
2.3.2 Resilienz im Schienenverkehr .....	17
2.3.3 Zusammenhang der Begriffe Resilienz und Robustheit .....	17
2.3.4 Eigene Definition von Resilienz im Schienenverkehr .....	18
<b>3 KPIs zur Bewertung der Resilienz des Eisenbahnsystems .....</b>	<b>19</b>
3.1 Bewertungsgrößen.....	20
3.2 Vier Resilienz Kriterien und ihre Einflussfaktoren.....	21
3.2.1 Robustheit.....	23
3.2.2 Redundanzen: Reserven und Ressourcen .....	27
3.2.3 Ressourceneffektivität / Lernfähigkeit.....	29
3.2.4 Reaktionsschnelligkeit.....	31
3.3 Ursache-Wirkungsbeziehungen zwischen den Kennzahlen .....	33
3.4 Wie kann die Resilienz eines Bahnsystems erhöht werden?.....	35
<b>4 Bewertung der Resilienz anhand von Betriebssimulationen am Beispiel SUMO ..</b>	<b>37</b>
4.1 Vorstellung geeigneter Simulationssoftware.....	37
4.1.1 Ein theoretisches Modellbeispiel .....	38

4.2	Bewertung und Auswahl geeigneter KPI für die Modellierung mittels Simulationssoftware .....	40
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>42</b>
	<b>Quellenverzeichnis.....</b>	<b>VI</b>
<b>A 1</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>A</b>
<b>A 2</b>	<b>Eidesstattliche Erklärung.....</b>	<b>1</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Südportal des Rastatter Tunnels nach dem Gleiseinbruch am 20.08.2017 .....	6
Abbildung 2: Auswirkungen des Klimawandels betreffen die Deutsche Bahn .....	9
Abbildung 3: Nach Hochwasser überflutete Gleise .....	10
Abbildung 4: Umgang der DB mit den Stürmen Xavier, Herwart und Friederike .....	11
Abbildung 5: Der Resilienzzzyklus .....	15
Abbildung 6: Einflussfaktoren auf Vulnerabilität und Resilienz (Quelle: Autorin) .....	20
Abbildung 7: Vier Resilienzeigenschaften.....	22
Abbildung 8: Einflussfaktoren auf die Robustheit eines Bahnsystems .....	25
Abbildung 9: Einflussfaktoren auf die Redundanzen eines Bahnsystems .....	28
Abbildung 10: Einflussfaktoren auf die Ressourceneffektivität eines Bahnsystems .....	30
Abbildung 11: Einflussfaktoren auf die Reaktionsschnelligkeit des Bahnsystems .....	32
Abbildung 12: KPIs zur Messung des Einsatzes von Schienenfahrzeugen im Bahnsystem..	33
Abbildung 13: Zuordnung der KPIs des Bewuchses in Schienennähe in Bezug zu den Resilienzzyklen .....	34
Abbildung 14: KPIs in Bezug zu den Resilienzkriterien.....	35
Abbildung 15: Auswirkungen von Störungen auf die Systemleistung und den Bahnbetrieb mit Bezug auf die Resilienzphasen .....	36
Abbildung 16: Ausschnitt aus dem norddeutschen Streckennetz der Deutschen Bahn.....	39
Abbildung 17: Einflussfaktoren auf die Resilienz eines Bahnsystems.....	42

# Abkürzungsverzeichnis

Bspw.	Beispielsweise
Bzgl.	Bezüglich
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
EIU	Eisenbahninfrastrukturunternehmen
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
ISO	International Organization of Standardization
JIT	Just in time
KPI	Key Performance Indicator
Ores	Association for Organisational Resilience
OSM	Open Street Map
SGV	Schienengüterverkehr
SPV	Schienenpersonenverkehr
SUMO	Simulation of urban mobility
u.a.	Unter anderem

# 1 Einleitung

## 1.1 Vorstellung der Ausgangssituation

Verspätungen sind im Bahnbetrieb keine Seltenheit. Wer häufig mit der Bahn reist, der ist Verspätungen gewohnt. Die häufigsten Ursachen für Verspätungen waren im Jahr 2016 beschädigte Gleise, die repariert werden mussten und dadurch teilweise langwierige Baustellen zur Folge hatten, aber auch alte und damit einhergehend defekte Schienenfahrzeuge, die ebenfalls nicht genutzt werden konnten und damit zwischenzeitlich ausfielen.<sup>1</sup> Für den Reisenden sind derartige Störungen vor allem dann von Bedeutung, wenn dadurch, den eigenen Reiseverlauf betreffend, Umsteigevorgänge unmöglich gemacht oder Termine verpasst werden.

In der Summe haben auch derartige, geringfügige Störungen einen nicht zu unterschätzenden Einfluss sowohl auf die Attraktivität der Bahn als Verkehrsmittel für den Kunden, als auch auf die Effizienz und den Kostenaufwand der Bahnunternehmen. Verspätete Züge bedeuten demnach für Kunden und Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU), sowie Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) gleichermaßen Unannehmlichkeiten und einen höheren als geplanten Aufwand. Oftmals ziehen sie zudem Ersatzforderungen und Vertrauensverluste nach sich, wodurch Kosten für die EVU und EIU entstehen. Um diese zu vermeiden, ist es seit langem Ziel der Bahnbetriebe, Verspätungen und unplanmäßige Wartezeiten möglichst gering zu halten.

Weitaus dramatischer verhält es sich, wenn aus einer überschaubaren Verspätung ein Ausfall wird. Im vergangenen Winter 2017 sind nicht zum ersten Mal sämtliche Bahnverkehre vorübergehend eingestellt worden. Anlass dazu war der Sturm „Herwart“, welcher Deutschland stark zusetzte. Nachdem u.a. sämtliche Oberleitungen durch den starken Wind zerstört wurden und entwurzelte Bäume die Fahrwege versperrten, folgte als letzte Maßnahme ein Stillstand vieler Züge.<sup>2</sup>

Stürme, klimabedingte Witterungsextreme und auch Anschläge sind außergewöhnliche Notzustände für ein Bahnsystem. Anders als bei alltäglich auftretenden Störungen können diese nur bedingt vorausgesehen werden. Ein Eintreten geschieht in den meisten Fällen plötzlich und bietet auf den ersten Blick wenige Chancen für Prävention. Tritt ein solcher

---

<sup>1</sup> Vgl. Seher, D. (2016), 10.10.18

<sup>2</sup> Vgl. Sagener, N. (2017), 14.08.18

Notfall, ein Störfall, ein, so ist die Höhe des tatsächlichen Schadens abhängig von der Reaktion der EVU und EIU auf die Situation.

Resilienz ist ein Begriff, der u.a. die Fähigkeit eines Systems beschreibt, nach einem tiefen Rückschlag möglichst schnell einen adäquaten Zustand zu erreichen und sich schließlich ganz davon zu erholen. Dabei geht es nicht lediglich darum, die Störung in kürzester Zeit zu beheben, um den Betrieb wieder aufnehmen zu können, sondern auch auf einen unvorhersehbaren Notfall vorbereitet zu sein. Resilienz hat zudem den Anspruch, ein gesamtes System inklusive Umgebung zu betrachten. Bei einem Bahnsystem sind dies neben der Infrastruktur, den Fahrzeugen, dem Bahnunternehmen und den Fahrgästen auch andere Verkehrsträger und alles, was in irgendeiner Form in Berührung mit dem Bahnbetrieb kommt.

„Bahnsysteme zählen zu den kritischen Infrastrukturen: Ein großflächiger Ausfall infolge schwerer Störereignisse hat immense finanzielle, ökonomische und gesellschaftliche Folgen.“<sup>3</sup> Sie haben somit einen besonderen Bedarf an Resilienz. Als kritische Infrastrukturen werden Organisationen betrachtet, deren Dienstleistung für eine Funktion der Gesellschaft unverzichtbar sind. Dazu gehören neben der Strom- und Wasserversorgung auch das Gesundheitswesen, die Lebensmittelversorgung und letztlich der Transport von Personen und Gütern.<sup>4</sup>

## **1.2 Motivation und Problemstellung**

Die Masterarbeit entsteht im Rahmen des Projektes Next Generation Railway System III, ein Projekt des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) unter der Leitung von Benedikt Scheier, welcher auch zeitgleich die Betreuung dieser Ausarbeitung übernimmt. Ziel des Projektes ist es, Konzepte zu entwickeln, die den Schienenverkehr effektiver und vor allem nutzerfreundlicher aufstellen sollen.<sup>5</sup> Ein resilientes Bahnwesens ist die Voraussetzung dafür, dass die Reisenden auch in außerordentlichen Situationen ihren Weg fortsetzen können.

In vielen Fachbereichen ist Resilienz ein stark diskutierter Begriff. Während er in den meisten Bereichen schon ausführlicher betrachtet wurde und als Qualitätsmerkmal auch Anwendung findet, bietet das Bahnwesen dahingehend noch viel Forschungspotential. Auch wenn hier der Begriff Resilienz nicht mehr als unbekannt bezeichnet werden darf, fehlt es bisher u.a. an

---

<sup>3</sup> Dorbritz, R.; Weidmann, U. (2012), S. 212

<sup>4</sup> Vgl. Apel, M. et al. (2017), S. 30

<sup>5</sup> Vgl. Scheier, B. (2015), Stand: 18.10.2018

einer Begriffsdefinition und einer Möglichkeit, die Resilienz eines Bahnsystems zu bewerten. Die Masterarbeit hat deshalb zum Ziel, den Resilienz-Begriff für das Bahnwesen zu definieren und geeignete Key Performance Indikatoren (KPI) für eine qualifizierte Bewertung der Resilienz eines Eisenbahnsystems zu identifizieren. Anschließend werden Vorschläge gemacht, wie mittels Eisenbahnbetriebssimulationen Maßnahmen zur Steigerung der Resilienz bewertet oder Bahnsysteme hinsichtlich ihrer Resilienz miteinander verglichen werden können.

In Hinblick auf die beschriebene Ausgangslage und Problemstellung ergibt sich folgende Forschungsfrage: **Inwiefern ist es möglich, die (Nicht-) Resilienz eines Bahnsystems mithilfe von Key Performance Indikatoren zu bewerten?**

### **1.3 Zielsetzung und Vorgehen**

Um geeignete Key Performance Indikatoren (KPIs) identifizieren und validieren zu können, wird an erster Stelle der Forschungsstand zum Resilienz-Begriff durch ausführliche Recherche, auch in anderen Disziplinen, abgebildet. Auf dieser Grundlage soll dann eine Einordnung des Begriffs in das Bahnwesen erfolgen, um schließlich eine aussagekräftige Definition treffen zu können.

Im theoretischen Hauptteil der Arbeit werden mögliche Key Performance Indikatoren recherchiert und untersucht. Einflussfaktoren auf diese KPIs werden identifiziert und die Ursache-Wirkungsbeziehungen werden dargestellt. Ziel ist, einige wenige KPIs zu identifizieren, die zur Bewertung der Resilienz besonders geeignet sind.

Anschließend soll diskutiert werden, welche der zuvor beschriebenen KPIs für die Bewertung eines Bahnsystems mittels Simulationssoftware geeignet sind. Als Beispiel dient dazu das Simulationsprogramm SUMO (**S**imulation of **U**rban **M**obility).



## **2 Resilienz**

### **2.1 Betrachtungsraum**

Für den Gebrauch in dieser Ausarbeitung soll nun der Umfang des Begriffs Bahnsystem erläutert werden. Er umfasst den Schienengüterverkehr (SGV), sowie den Schienenpersonenverkehr (SPV) mit seinen Unterarten Schienenpersonenfernverkehr (SPFV) und Schienenpersonennahverkehr (SPNV). Der SPV wird in diesem Rahmen jedoch auf den Hochgeschwindigkeitsverkehr, den Fernverkehr und den Regionalverkehr beschränkt. Der Stadtschnellverkehr und der Stadtverkehr sind nicht Teil der Untersuchung.

Für die Resilienz Betrachtung des Bahnsystems ist eine Festlegung der grundlegenden Funktionen notwendig, da diese den Kern des Systems darstellen. Die Funktionalität bzw. das Betriebsziel des zu untersuchenden Bahnsystems ist die Ortsveränderung von Personen und Gütern.<sup>6</sup> Im Rahmen dieser Ausarbeitung werden beide Ausführungen betrachtet. Die Personenbeförderung steht jedoch im Fokus, da die Reisenden im Falle einer außerordentlichen Störung unmittelbar von den Auswirkungen betroffen sind. Das Zeitintervall in Relation zum Schadensausmaß ist deutlich kleiner als bei Gütern.<sup>7</sup> Eine ausbleibende Lieferung von Gütern bedeutet zwar im Falle von Just in Time (JIT) Lieferungen ebenfalls einen nicht zu unterschätzenden wirtschaftlichen Schaden, jedoch werden Gütertransporte üblicherweise nicht so kurzfristig eingeplant.

### **2.2 Warum ist Resilienz so wichtig?**

Störungen gehören zum Alltag des Bahnbetriebs. Die Größe und Komplexität eines Bahnsystems bieten gemeinsam eine unüberschaubare „Spielfläche“ für Ausfälle und Komplikationen. Um auftretende Störungen rechtzeitig beheben zu können, verfügen EIU und EVU über ein spezielles Störfallmanagement.

---

<sup>6</sup> Vgl. Janicke, J. (2011), S. 12

<sup>7</sup> Vgl. Mann, H. - U. (2015), S. 96-101

### 2.2.1 Ist das klassische Störfallmanagement nicht die Lösung?

Den größten Teil der Störfälle machen die sogenannten Kleinstörungen aus. Viele dieser Störungen mit einzeln geringfügigem Ausmaß treten mehrmals auf, sodass eine Generalisierung der Störungen und damit eine Vorbereitung durch das Störfallmanagement in den meisten Fällen möglich ist. Mit einem Störfallmanagement soll eine Reduzierung der Kosten für die Ressourcen und der Wiederherstellung des geplanten Betriebes, sowie eine Erhöhung der Kundenzufriedenheit erreicht werden. Dabei ist das Vorgehen eines Störfallmanagements wie folgt: Vor Eintritt eines Störfalles werden mögliche Ausfälle und sonstige Auswirkungen prognostiziert. Auf dieser Grundlage können Maßnahmen entwickelt werden, die beispielsweise das Umleiten oder vorzeitige Wenden von Zügen beinhalten. Das Verhalten bei Eintritt der Störung ist in einem sogenannten Störfallprogramm vordefiniert. Ziel ist es, das Durcheinander im Eintritt einer Störung die möglichst gering zu halten.<sup>8</sup>

Das Störfallmanagement beschränkt sich folglich, wenn es um Risikoprävention geht, eher auf wahrscheinliche Störfälle, um auf diese im Fall eines Eintritts optimal vorbereitet zu sein und möglichst schnell reagieren zu können. Störfälle sind demnach in zwei Kategorien einzuteilen:

1. Vorhersehbare Störungen
2. Unvorhersehbare Störungen

Die erste Kategorie von Störungen wird von einem Störfallmanagement bestmöglich abgedeckt. Dabei werden auch Großstörungen berücksichtigt, die ein großes Risiko darstellen:

*„[...] Störfallprogramme [sollten] sowohl für Störungen, die geringere Auswirkungen haben, deren Eintritt jedoch sehr wahrscheinlich ist, als auch für sehr seltene Störungen mit sehr großen Auswirkungen (z.B. Komplettausfall eines elektronischen Stellwerks) entwickelt [werden].“<sup>9</sup>*

Deutlich erkennbar in dieser Aussage ist der Bezug auf analysierte und damit bekannte und vorhersehbare Störungen. Unvorhersehbare Störungen finden jedoch deutlich zu wenig Beachtung. Hier kommt die Resilienz in Spiel. Denn eben diese nicht einberechneten, plötzlich eintretenden Störungen, oftmals mit verheerenden Auswirkungen, bringen das sonst kontrollierbar scheinende Bahnsystem aus dem Gleichgewicht.

---

<sup>8</sup> Vgl. Oetting, A. (2014), S.16 f.

<sup>9</sup> Ebd, S.17

Ein passendes Beispiel dazu lieferte der Tunneleinbruch bei Rastatt im August 2017. Eines der größten Bauabschnitte im Rahmen des Großprojektes „Ausbau- und Neubaustrecke Karlsruhe-Basel“ war die Untertunnelung unter das Stadtgebiet Rastatts.<sup>10</sup> Wie auf nachstehender Abbildung ersichtlich, ereignete sich während der Bauarbeiten, bisher aus ungeklärter Ursache, eine Havarie, in Folge derer sich die Gleise oberhalb des Tunnels stark absenkten:

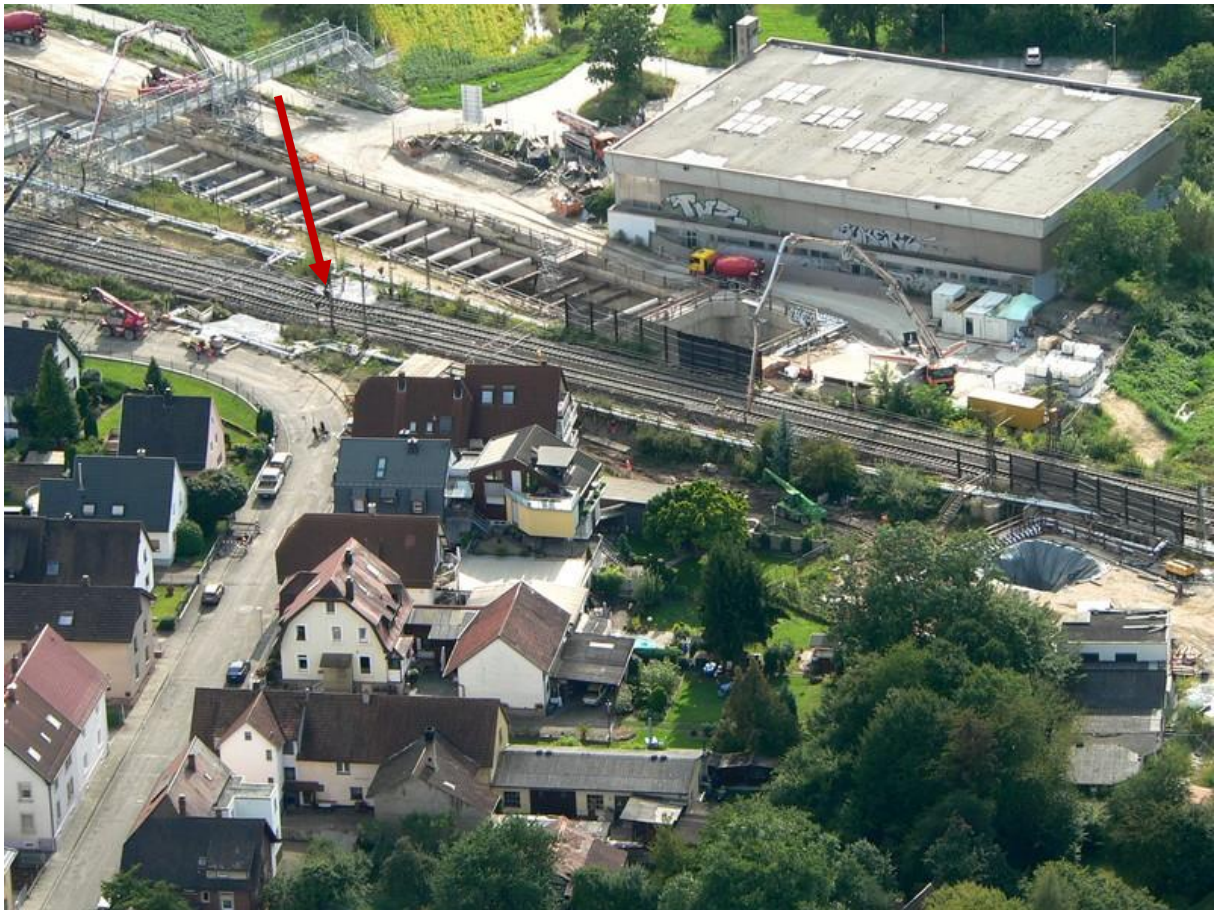


Abbildung 1: Südportal des Rastatter Tunnels nach dem Gleiseinbruch<sup>11</sup> am 20.08.2017

Das Ergebnis war eine monatelange Sperrung der Rheinstrecke, die durch ihre Funktion als hochleistungsfähige Verbindungsstrecke von Rotterdam nach Südeuropa als eine der wichtigsten Strecken der Deutschen Bahn gilt und damit für den europäischen Güterverkehr sehr wichtig ist. An diesem Vorfall wird die Notwendigkeit von Umleitungsstrecken deutlich. Da es keine Alternativen zur zentralen Nord-Süd-Trasse gibt, mussten sämtliche Unternehmen andere Verkehrsträger für den Transport ihrer Güter nutzen. 200 Güterzüge pro Tag passierten vor dem Vorfall üblicherweise die Strecke. Diese Auswirkung betraf

---

<sup>10</sup> Vgl. o. V. (2016)

<sup>11</sup> Lothar3 (2017)

insbesondere die Stahlbranche und die Chemieindustrie.<sup>12</sup> Der Baustellenunfall bei Rastatt ist ein Beispiel für eine Großstörung, mit welcher nicht gerechnet wurde. Zwar handelte es sich hier auch um eine Gleisstörung, welche üblicherweise in den Aufgabenbereich des Störfallmanagements fallen, doch das unvergleichlich hohe Ausmaß des Schadens und die gegebenen Randbedingungen, reichen über den Horizont eines Störfallmanagements hinaus: Sie greifen die Resilienz des Bahnsystems an. Ähnlich verhält es sich mit Störungen, welche gebietsübergreifend wirken.

Resilienz hat den Anspruch, auch auf Ereignisse vorbereitet zu sein, die nicht vorhersehbar sind und dementsprechend von einem Störfallmanagement nicht klassisch einbezogen werden. Ihr Schadensausmaß fällt aus diesem Grund unvergleichbar groß aus. Insbesondere aufgrund mangelnder Vorbereitung und der neuartigen, ungewohnten Situation.<sup>13</sup>

### **2.2.2 Welche Störungen sind für diese Ausarbeitung interessant?**

Ob durch den Klimawandel oder durch andere Ursachen beeinflusst – witterungsbedingte Extremereignisse häufen sich. Hitzeperioden ziehen bspw. Sperrungen von Zugwagen aufgrund defekter Klimaanlage mit sich und Trockenheit verursacht eine steigende Zahl von Böschungs- und Waldbränden, wie sie im Jahr 2018 häufiger aufgetreten sind. Trotz der zukünftig weiter abnehmenden Schnee- und Kältetage können unerwartete Tiefsttemperaturen für eine Vereisung der Oberleitungen sorgen. Für derartige Fälle muss der Schienenverkehr gerüstet sein.<sup>14</sup>

Im Jahr 2009 fasste Roll einige Klimafolgen auf den Schienensektor zusammen. Viele davon haben sich bereits ereignet und sind als aktuelle Bedrohungen für den Schienenverkehr anzusehen. Roll geht dabei auf folgende Ausprägungen näher ein und benennt ihre Auswirkung auf den Bahnverkehr<sup>15</sup>:



#### **Temperaturerhöhung:**

Durch eine Temperaturerhöhung von bis zu 2°C steigt die Gefahr von Waldbränden entlang der Bahnanlagen. Auch Böschungsbrände werden wahrscheinlicher. Zudem schaden hohe Temperaturen dem Oberbau, da

---

<sup>12</sup> Vgl. Frey, T. (2017)

<sup>13</sup> Vgl. Schachenhofer, U.; Seitz, E. (2017)

<sup>14</sup> Vgl. o. V. (2018a)

<sup>15</sup> Vgl. Roll, E. (2009), S.606.

diese für derartige Klimabedingungen nicht ausgelegt sind. Außerdem müssen sämtliche Anlagen wie elektronische Stellwerke bei Hitze mit leistungsfähigeren Lüftungseinrichtungen ausgestattet werden.



#### **Veränderte Niederschlagsverteilung:**

Zu den Klimafolgen gehört eine Umverteilung der Niederschläge, nach welcher Niederschläge im Sommer seltener, stattdessen aber häufiger in den übrigen Jahreszeiten auftreten. Die Folgen davon sind Überschwemmungen, Erdrutsche sowie Unterspülungen des Gleisoberbaus.



#### **Stürme:**

Insbesondere verstärkt an der Nordseeküste treten häufiger Stürme auf. In diesem Zusammenhang blockieren entwurzelte Bäume häufiger die Strecke oder beschädigen Oberleitungen. Zudem kann es durch die Windstärke zu reißenden Bahnstromleitungen kommen.

Hinzu kommt die Gefahr von Eisbildung bei Kälte und Feuchtigkeit in den Wintermonaten, wodurch die Oberleitungen beeinträchtigt werden.

Nachfolgendes Diagramm veranschaulicht den deutlich erkennbaren Anstieg von Stürmen, Hitzeperioden und starken Niederschlägen im Verlauf der vergangenen 18 Jahre:

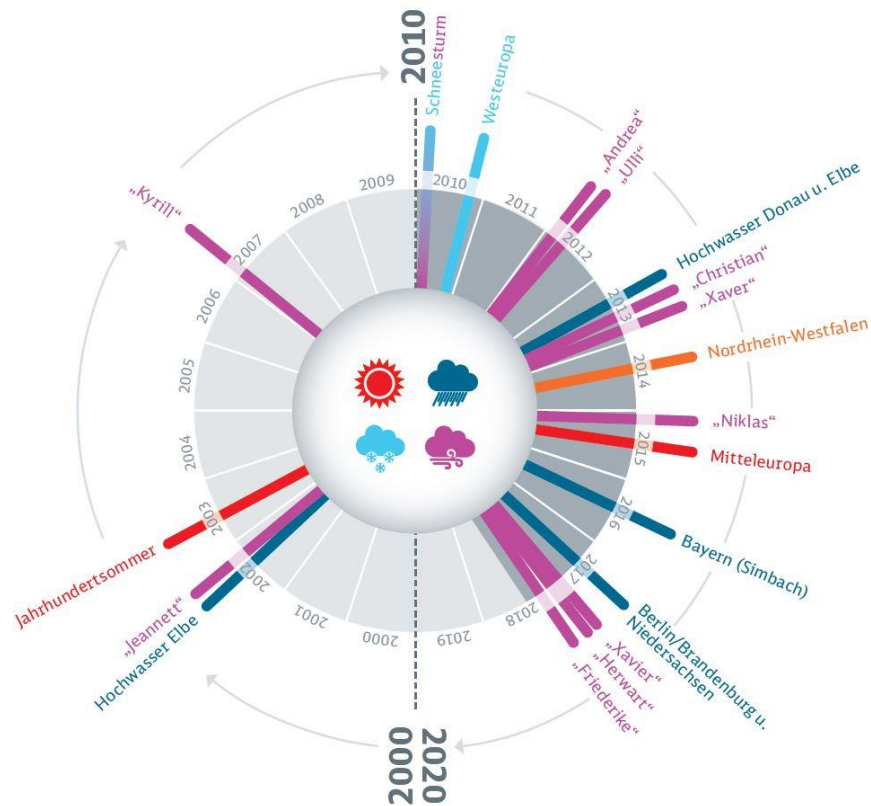


Abbildung 2: Auswirkungen des Klimawandels betreffen die Deutsche Bahn<sup>16</sup>

Genannte Unwetterereignisse sollen im Rahmen dieser Arbeit repräsentativ für Extremstörungen untersucht werden, welche die Resilienz des Bahnsystems auf den Prüfstand stellen. Denn derartige Ereignisse treten, zumindest auf den ersten Blick, meist unvorhersehbar und immer unvermeidbar auf. Dies gilt insbesondere für Unwetterereignisse, die, bspw. durch den Klimawandel beeinflusst, bisher in der betrachteten Umgebung in der Zukunft erstmals auftreten werden. Zudem bewirken jegliche Großstörungen häufig einen flächen- und zeitmäßig großen Ausfall. Neben dem zwangsweise ausfallenden Bahnbetrieb gehen in der Regel immense materielle Schäden mit dem Eintreten eines solchen Extremfalls einher. Für Kunden bedeutet dies in einigen Fällen der komplette Wegfall des gewohnten Verkehrsmittels und in jedem Fall einen höheren Zeitaufwand aufgrund von Umleitungen oder alternativer Verkehrsmittelwahl.

Zur Verdeutlichung der Schadensausmaße und der Dringlichkeit neuer Denk- und Handlungsweisen werden in diesem Kapitel einige Störfälle beispielhaft umrissen, die die

<sup>16</sup> o. V. (2018b)



Möglichkeiten des klassischen Störfallmanagements übersteigen und somit interessant für die Betrachtung der Resilienz des Systems sind.

### 2.2.3 Hochwasser im Juni 2013

Überraschend und mit langfristigen Folgen wirkte sich im Juni 2013 ein Hochwasser auf den Fernverkehr der DB im norddeutschen Raum aus. Der Bruch eines Elbedeichs, welcher dem Druck der großen Wassermassen nicht standhalten konnte, ermöglichte ein Abfließen des Wassers auf das dahinter liegende Land, wobei ein fünf Kilometer langer Gleisabschnitt zwischen Schönhausen und Schönhauser Damm überflutet wurde. Folgende Abbildung zeigt die vollständige Überflutung der Strecke am 11.06.2013:



Abbildung 3: Nach Hochwasser überflutete Gleise<sup>17</sup>

Bis zur Wiederinbetriebnahme der Hauptverkehrsachse von Hannover nach Berlin sollte es fünf Monate dauern. In der Zwischenzeit wurden sämtliche Zugfahrten über umliegende Strecken umgeleitet, wodurch die jeweiligen Reisezeiten stark verlängert wurden. Durch den Einsatz von ca. 80.000 Mitarbeitern, konnten alternative Fahr- und Baupläne für die Instandsetzung erstellt werden. Die Anzahl von 10.000 angepassten Fahrplänen spiegelt dabei den Aufwand des aufrecht zu erhaltenden Betriebs wider.<sup>18</sup>

---

<sup>17</sup> o. V. (2014)

<sup>18</sup> Vgl. Hebenstreit, F. et al. (2014), S. 23

## 2.2.4 Stürme „Xavier“, „Herwart“ und „Friederike“

Innerhalb eines halben Jahres zogen drei große Stürme über Norddeutschland. Durch die Intensität der Stürme wurde in den betroffenen Gebieten der Verkehr eingestellt. Dies betraf den Straßen-, Luft- und auch den Schienenverkehr. Die Deutsche Bahn reagierte dabei auf die Stürme unterschiedlich. Während sie bei dem ersten Sturm „Xavier“ versuchte, den Betrieb auch trotz des Unwetters weiterzuführen, entschied sie sich bei den darauffolgenden Stürmen „Herwart“ und „Friederike“, die vergleichbar stark waren, für einen vorübergehenden Stillstand der Züge, um nach Abebben des Sturmes einen schnelleren Einstieg in den Normalbetrieb zu erreichen oder einen Nothalt von Zügen auf der Strecke zu vermeiden.<sup>19</sup>

Diese Reaktion ist das Ergebnis eines Lernprozesses durch den ersten Sturm. Eine Reaktion, die, wie folgende Darstellung zeigt, das gewünschte Ziel ermöglicht hat: Während der Zeitraum der sturmbedingten Zugausfälle nach dem Sturm „Xavier“ noch 9 Tage betrug, wurden durch die vorsorgliche Einstellung des Betriebs während des Sturms bei den Stürmen „Herwart“ und „Friederike“ lediglich 1-3 Tage benötigt:

"Xavier"	"Herwart"	"Friederike"
04. – 06. Oktober 2017 Windgeschw. Spitze 201 km/h	28. – 29. Oktober 2017 Windgeschw. Spitze 182 km/h	18. – 19. Januar 2018 Windgeschw. Spitze 205 km/h
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ <b>Sturm: sehr stark</b></li> <li>■ <b>betriebliche Auswirkung: sehr hoch</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ <b>Sturm: stark</b></li> <li>■ <b>betriebliche Auswirkung: begrenzt</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ <b>Sturm: sehr stark</b></li> <li>■ <b>betriebliche Auswirkung: begrenzt</b></li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ reaktive Einstellung Bahnverkehr</li> <li>■ meßbare erhöhte Zugausfälle/-teilausfälle bei DB Regio: 9 Tage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ vorsorgliche Einstellung Bahnverkehr</li> <li>■ meßbare erhöhte Zugausfälle/-teilausfälle bei DB Regio: 2-3 Tage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ stärkster Orkan seit Kyrill 2007 (jedoch regional begrenzter)</li> <li>■ vorsorgliche Einstellung Bahnverkehr</li> <li>■ klare Warnung am Vortag</li> <li>■ deutlich kleinere betriebliche Auswirkungen, am Tag nach dem Sturm weitgehend Normalbetrieb (später: NRW)</li> </ul>

Abbildung 4: Umgang der DB mit den Stürmen Xavier, Herwart und Friederike<sup>20</sup>

<sup>19</sup> Vgl. Terhaag, O. (2018)

<sup>20</sup> Terhaag, O. (2018)



## **2.3 Bedeutung und Einordnung des Begriffs Resilienz im Schienenverkehr**

Für ein umfassendes Begriffsverständnis wird das Thema Resilienz in diesem Kapitel an erster Stelle inter- bzw. multidisziplinär betrachtet, um daraus anschließend den Resilienz-Charakter und seine Grundzüge ableiten zu können. Danach erfolgt die Einordnung des Begriffs in den Bereich des Schienenverkehrs.

### **2.3.1 Resilienz in anderen Disziplinen - der Grundgedanke**

Von der kleinsten Instanz zum großen Ganzen: Resilienz beginnt bei dem einzelnen Menschen und macht auch an Landesgrenzen nicht Halt. Seit der Begriffsfindung werden sämtliche Systeme auf Resilienz geprüft. Dieses Kapitel vermittelt einen Einblick in die „Welt der Resilienz“, um den Grundgedanken daraus ableiten zu können.

#### **2.3.1.1 Resilienz in der Psychologie**

Der Begriff Resilienz hat seinen Ursprung in der Entwicklungspsychologie. Erste nähere Erkenntnisse zu dem Thema lieferte das Forscherteam um E. E. Werner und R.S. Smith, welches in Hawaii die bekannte Kauai-Studie durchführten. Dabei wurde ein Zusammenhang zwischen Risiko- und Schutzfaktoren und dem persönlichen Erfolg festgestellt.<sup>21</sup> Welter-Endelin definierte den Begriff Resilienz für die Psychologie wie folgt:

*„Unter Resilienz wird die Fähigkeit von Menschen verstanden, Krisen im Lebenszyklus unter Rückgriff auf persönliche und sozial vermittelte Ressourcen zu meistern und als Anlass für Entwicklung zu nutzen“<sup>22</sup>*

Diese Definition umfasst folgende Aspekte:

1. Der entscheidende Moment, in dem sich Resilienz oder ein Mangel an Resilienz zeigt, ist der Krisenmoment.
2. Zur Bewältigung der Krise wird aktiv gehandelt. Dabei werden Ressourcen genutzt, die schon vorhanden sind.
3. Die Krise wird als Chance zur Weiterentwicklung verstanden. Die Person geht aus der Krisensituation gestärkt heraus und kehrt wieder in den „Alltag“ zurück.

---

<sup>21</sup> Vgl. Werner, E. E.; Smith, R. S. (1982)

<sup>22</sup> Vgl. Teuber, S., Dickes, I. (2013)

### 2.3.1.2 Resiliente Städte; von kritischen Infrastrukturen zur sozialen Resilienz

Auch in Bezug auf Städte ist Resilienz ein relevantes Thema. Besonders in Krisengebieten ist die Resilienz ganzer Städte gefragt. Terroranschläge, Lawinenkatastrophen, Finanzkrisen, langfristige Stromausfälle oder eine plötzlich fehlende Wasserversorgung erfordern außergewöhnliche Maßnahmen und den Zusammenhalt ganzer Gemeinschaften. Laut Schachenhofer und Seitz werden derartige Umstände in der Forschung als „X-Events“ bezeichnet: unvermutete Ereignisse mit katastrophalem Ausmaß. Eine Gesellschaft ist dann resilient, wenn sie im Krisenfall gemeinsam richtig reagiert und über die erforderlichen Ressourcen und Fähigkeiten verfügt.<sup>23</sup>

Resilienz ist für Städte und Länder gerade deshalb so essentiell, weil sämtliche lebenswichtigen Infrastrukturen miteinander verbunden sind und damit eine Abhängigkeit voneinander entwickelt haben. Fällt heute der Strom aus, gibt es nicht nur kein Licht: Auch ein Großteil der Informations- und Kommunikationswege kann plötzlich nicht mehr genutzt werden.<sup>24</sup> Eine resiliente Stadt benötigt deshalb *„sowohl technische Maßnahmen in Form von Redundanzen und Puffern als auch angepasste Organisations- und Governancestrukturen von Infrastrukturbetreibern, Aufsichtsbehörden und Katastrophenschutzorganisationen.“*<sup>25</sup>

In diesem Zusammenhang nimmt das sogenannte Verletzlichkeitsparadoxon eine bedeutende Rolle ein. Bartels und Lorenz betonen, dass es nicht Ziel einer Gesellschaft sein sollte, Ausfälle jeglicher Art zu vermeiden. Denn je seltener Sicherheiten ausfallen, desto ungeübter ist die Gesellschaft im Umgang mit ihrem Wegfall. Stattdessen sollten Verhaltensvorgaben für den Krisenfall mit der Bevölkerung kommuniziert werden.<sup>26</sup>

Dem Verständnis einer resilienten Stadt kann folgendes entnommen werden:

- Mit einem Ausfall eines beliebigen, möglicherweise überlebenswichtigen Systems ist zu rechnen
- Ausschlaggebend ist der richtige Umgang mit der Krisensituation

---

<sup>23</sup> Vgl. Schachenhofer, U., Seitz, E. (2017)

<sup>24</sup> Vgl. Bartels, M., Lorenz, D. (2017)

<sup>25</sup> Bartels, M., Lorenz, D. (2017)

<sup>26</sup> Vgl. Ebd.

### 2.3.1.3 Resiliente Unternehmen

Im Zusammenhang mit Unternehmen und Organisationen wird Resilienz ebenfalls als „Widerstandsfähigkeit gegenüber Störungen, Krisen und Niederlagen“<sup>27</sup> verstanden. Jedoch ist wie in vielen anderen Bereichen nicht deutlich, womit eine solche Widerstandsfähigkeit erreicht werden kann. Einer Vorbereitung auf Unvorhersehbares als Schlüssel für Resilienz, steht eine schnelle Reaktionsfähigkeit im Fall einer unvorhergesehenen Störung gegenüber. Mit dem Ziel Unternehmen hinsichtlich ihrer Resilienz-Kompetenz zu beraten und zu unterstützen, wurde 2017 ein erster Verband für organisationale Resilienz (Association for Organisational Resilience) (Ores) von einem Team von Resilienzexperten aus der Schweiz, Deutschland und Österreich gegründet.

Zudem wurden für eine Messbarkeit von organisationaler Resilienz 2017 eine ISO-Norm mit der Ziffer 22316 von der International Organization of Standardization (ISO) erstellt.<sup>28</sup> Diese enthält neun Eigenschaften, welche ein resilientes Unternehmen ausmachen und anhand derer Handlungsempfehlungen abgeleitet werden können.<sup>29</sup>

1. Einheitliche Unternehmensvision auf allen Hierarchieebenen
2. Umfassende Kenntnis aller eigenen und unmittelbaren Systeme, sowie hinreichende Einflussmöglichkeiten
3. Stabile Führung in Krisensituationen, mit dem Bestreben, aus Fehlern zu lernen
4. Positive und resilienzfördernde Strukturen, in welchen die Verfassung des einzelnen Mitarbeiters eine wichtige Rolle spielt
5. Transparente Kommunikationspolitik zwischen allen Mitarbeitern, während mit Fehlern gerechnet und aus ihnen gelernt wird
6. Anschaffung wichtiger Ressourcen, die die Anfälligkeit des Unternehmens ausgleichen und im Notfall für eine schnelle Reaktion nützlich sind
7. Transparenz und durchgehende Zusammenarbeit der einzelnen Unternehmensbereiche mit einheitlicher Ausrichtung auf die gleichen Unternehmensziele
8. Evaluation vergangener Ergebnisse
9. Frühzeitiges Identifizieren von Veränderungen, sowie der adäquate Umgang mit ihnen

---

<sup>27</sup> Reuter, R. (2018)

<sup>28</sup> Vgl. Ebd.

<sup>29</sup> Vgl. Heller, J. (2017)

Der mehrheitlichen Auffassung zufolge ist ein Unternehmen niemals an sich resilient. Es kann dahingegen resilienzfördernd aufgestellt sein und ist abhängig von der Verfassung der Mitarbeiter. Sind diese zufrieden mit ihrer Arbeitssituation, fühlen sich vom Arbeitgeber wertgeschätzt und besitzen genügend Handlungsfreiräume, so können die Mitarbeiter auf Krisensituationen stabil und kreativ reagieren. Ein Unternehmen ist demnach so resilient wie seine Mitarbeiter.

#### 2.3.1.4 Resilienz in den Ingenieurwissenschaften

Auch in den Ingenieurwissenschaften, die sich mit dem Schutz kritischer Infrastrukturen beschäftigen, ist Resilienz ein wichtiges Ziel. Denn die Resilienz kritischer Infrastrukturen ist eine Voraussetzung für eine resiliente Gesellschaft. Resilienz wird hier als Sicherheitsstrategie, als „umfassender, holistischer Problemlösungsansatz“ angesehen.<sup>30</sup> Dieser Ansatz kann, wie die folgende Abbildung zeigt, in fünf Phasen aufgeteilt werden, die sich bei jedem Ereignis wiederholen und deshalb als Kreislauf dargestellt werden können:



Abbildung 5: Der Resilienzzyklus<sup>31</sup>

- **„prepare“**  
Mit dieser Phase beginnt der Zyklus. Hier geht es darum, Gefahren durch Warnsysteme zu erkennen und sich auf in Zukunft evtl. eintretende Ereignisse vorzubereiten. Vor allem werden Vulnerabilitäten und Risikofaktoren eines Systems identifiziert.
- **„prevent“**  
In dieser nächsten Phase sollen die vorher festgestellten Risikofaktoren gemindert werden, um so etwaige Krisen zu verhindern.
- **„protect“**

<sup>30</sup> Vgl. Scharte, B.; Thoma, K. (2016), S. 127

<sup>31</sup> Scharte, B.; Thoma, K. (2016), S. 128

Vor Eintritt einer Störung, die nicht abgewendet werden konnte, werden anschließend mithilfe von Schutzmechanismen die möglichen Schadensausmaße begrenzt.

- **„respond“**

Die darauffolgende Reaktion („respond“) ist der Umgang mit der eingetretenen Störung, welche sich darauf konzentriert, die Grundfunktionen eines Systems aufrechtzuerhalten.

- **„recover“**

In dieser letzten Phase kehrt das System wieder in seinen Ursprungszustand zurück. Es gleicht bestehende Schäden aus und lernt aus der Störungssituation, um auf zukünftige vorbereitet zu sein.<sup>32</sup>

### 2.3.1.5 verallgemeinerte Sicht auf Resilienz und Zusammenfassung

Für das Erreichen von Resilienz werden in jeder Disziplin Herangehensweisen empfohlen, die bei näherer Betrachtung einen Rückschluss auf den Resilienzcharakter ermöglichen. Bspw. definieren Zolli und Healy Prinzipien, über welche ein resilientes System verfügen sollte:

*„effektive Feedback-Mechanismen, dynamische Selbstanpassung, eingebaute Korrekturmechanismen, Abkopplung, Diversifizierung, Modularität, Einfachheit, Schwarmbildung und Zusammenballung – spielen für die Resilienz eines Systems eine entscheidende Rolle.“<sup>33</sup>*

Zolli zufolge können durch einen Abgleich dieser Prinzipien mit einem bestimmten System, Aussagen über dessen Resilienz oder Vulnerabilität getroffen werden.<sup>34</sup>

Auch die Technische Universität Darmstadt hat sich mit Resilienz befasst und 2017 ein interdisziplinär ausgerichtetes Kolloquium zu dem Thema „Beherrschung von Unsicherheit durch Resilienz“ veranstaltet. Hier wird Resilienz als „Egal was kommt“-Denkweise verstanden, die über das vorherige „was wäre wenn“ hinausgeht. Wichtige Funktionen eines resilienten Systems seien das „Überwachen, Reagieren, Lernen und Antizipieren“.<sup>35</sup>

Alle hier betrachteten Disziplinen haben bzgl. ihrer Resilienzbetrachtung folgendes gemein:

➔ Krisen werden erwartet

---

<sup>32</sup> Vgl. Scharte, B.; Thoma, K. (2016), S. 128 f.

<sup>33</sup> Zolli, A.; Healy, A. M. (2013), S. 23

<sup>34</sup> Vgl. Ebd. S. 24

<sup>35</sup> Vgl. o. V. (2017), Stand: 19.09.2018

- ➔ Die Reaktion auf die Krise ist entscheidend für deren Schadensausmaß
- ➔ Ziel ist, die Krise möglichst so zu überstehen, dass der Ausgangszustand wieder erreicht wird
- ➔ Aus der Krise soll für eine etwaige nächste gelernt werden

### **2.3.2 Resilienz im Schienenverkehr**

Nach der Betrachtung von Resilienz in den Bereichen Psychologie, Organisationen, Infrastrukturen und Gesellschaften ist die Frage danach entscheidend, wie ein resilientes Bahnsystem aussehen könnte. In diesem Kapitel wird der Begriff Resilienz in Bezug auf das im Kapitel 2.1 definierte Bahnsystem diskutiert. Dazu gehört die Abgrenzung von dem Begriff Robustheit und die Definition von Resilienz im Schienenverkehr.

Eine allgemeingültige Definition von Resilienz im Schienenverkehr ist (nach Ermessen des Autors) noch nicht vorhanden. Bisher wurden vor allem einzelne Teilsysteme des Bahnwesens wie die Informationssysteme und die Technik bspw. in Bezug auf Cyberangriffe<sup>36</sup> oder die Infrastruktur auf Resilienz geprüft.

### **2.3.3 Zusammenhang der Begriffe Resilienz und Robustheit**

Da die Begriffe Resilienz und Robustheit häufig fälschlicherweise synonym verwendet werden, erfolgt an dieser Stelle eine kurze Abgrenzung.

Doyle, California Institute of Technology, macht deutlich, über welche Schwachstellen ein „lediglich“ robustes System verfügt. Er prägte den Begriff „robust yet fragil“, welcher aussagt, dass Systeme zwar für voraussehbare Störungen vorbereitet sind und damit umzugehen wissen. Tritt jedoch eine unvorhersehbare Störung ein, gerät das System außer Kontrolle und es besteht zunächst kein Ansatz zur Wiederherstellung der Funktionalität, was bedeutet, dass es nicht resilient ist.<sup>37</sup>

Robustheit und Stabilität sind wichtige Eigenschaften, die das Grundgerüst des Bahnsystems bilden. Auch wenn diese notwendig sind, können sie auch die Ursache für die Nicht-Resilienz des Bahnsystems sein, da für eine hohe Robustheit sämtliche Systemabläufe standardisiert werden. Es wird versucht, dem System ein bestimmtes Maß an Ordnung zu verleihen, was gleichzeitig eine Anfälligkeit für außerordentliche Situationen schafft. Das

---

<sup>36</sup> Vgl. Schnieder, L. (2018)

<sup>37</sup> Vgl. Zolli, A.; Healy, A. M. (2013), S. 39

System scheint stabil oder robust zu sein, da es den eintretenden Störungen, auf die es vorbereitet ist, standhält. Eben diese Regelmäßigkeit und das Stärken von bestimmten Funktionen führen dazu, dass andere Bereiche durch ihre geringere Beachtung vernachlässigt werden und somit Schwachstellen entstehen können.

Zolli und Healy schildern das Problem folgendermaßen:

*„Kein stabiles, aber anfälliges System ist [...] jemals perfekt, denn jede denkbare Absicherung hat eine Kehrseite und kann, wenn auch im Ausnahmefall, zu mehr Anfälligkeit führen. In einem stabilen, aber anfälligen System ist die Gefahr von „schwarzen Schwänen“ – unwahrscheinlichen Ereignissen mit katastrophalen Folgen – sozusagen eingebaut.“*<sup>38</sup>

### 2.3.4 Eigene Definition von Resilienz im Schienenverkehr

Als Grundlage für die Definition von Resilienz im Schienenverkehr soll die folgende Beschreibung eines resilienten, informationstechnischen Systems im Bereich Cybersecurity gelten.<sup>39</sup> Es besteht aus folgenden drei Komponenten:

- a) *„Das System und die Organisation sollen auf ungünstige Bedingungen und/oder außergewöhnliche Beanspruchungen vorbereitet sein.*
- b) *Das System soll auf ungünstige Bedingungen und/oder außergewöhnliche Beanspruchung reagieren können und seine wesentlichsten Funktionen, trotz einer möglichen eingeschränkten Funktionalität, aufrechterhalten können.*
- c) *Das System soll innerhalb eines akzeptierbaren Zeitintervalls wieder in einen definierten Systemzustand zurückkehren können.“*

Die in dieser Ausarbeitung betrachteten Störfälle sind als besonders ungünstig einzustufen, da sie den Bahnbetrieb für mehrere Tage verhindern können. Ist eine Strecke durch das Unwetter bedingt nicht befahrbar, müssen Alternativen für die Aufrechterhaltung der Funktionalität, nämlich dem Transport der Reisenden, gewählt werden. Das akzeptierte Zeitintervall für die Rückkehr in einen zuvor definierten Systemzustand ist stark abhängig von den Interessen der jeweiligen EVU und EIU.

---

<sup>38</sup> Zolli, A; Healy, A. M. (2013), S.41

<sup>39</sup> o. V. (2016)

Auf das betrachtete Bahnsystem angewandt, kann eine Definition wie folgt aussehen:

**Ein Bahnsystem ist resilient, wenn es vorbereitet ist auf unerwartete Ereignisse mit außergewöhnlichen Auswirkungen. Es kann auf diese so reagieren, dass die Grundfunktionen des Systems aufrechterhalten werden können und findet nach einem zuvor definierten Zeitabschnitt wieder in den Ursprungszustand zurück.**

Für ein resilientes Verhalten in der Krisensituation, sollten zudem innerhalb der involvierten Bahnunternehmen die Regeln/Richtlinien der organisationalen Resilienz befolgt werden. Dies betreffen insbesondere die Kommunikation und Zusammenarbeit der Mitarbeiter untereinander und mit den Reisenden.

### **3 KPIs zur Bewertung der Resilienz des Eisenbahnsystems**

Resilienz ist eine situationsbezogene Eigenschaft, weshalb sie sich auch nur situationsabhängig bewerten lässt. „Es gibt in Sachen Resilienz kein Schwarz und Weiß, nur ein Mehr oder Weniger.“<sup>40</sup> Wie resilient ein Bahnsystem ist, hängt letztlich davon ab, wie mit der aktuellen Störung umgegangen wird.

Kann dann eine Voraussage über das Verhalten bei zukünftigen Störungen getroffen werden? Dies ist nur dann konkret möglich, wenn die zukünftige Störung eine vergleichbare Situation wie die vorherige bewirkt. Was darüber hinausgeht, bleibt ungewiss. Dennoch können und müssen Prognosen über mögliche Extremsituationen und Analysen der Umwelt regelmäßig vorgenommen werden, da diese erst eine Vorbereitung auf den Eintritt einer solchen Situation ermöglichen. Ob die Vorbereitungen ausreichend sind und das System dadurch als resilient zu bezeichnen ist, entscheidet sich mit jeder Krise neu.

Die Bewertung der Resilienz des Bahnsystems ist demnach nicht absolut. Dennoch ist eine Analyse der Widerstandsfähigkeit des eigenen Systems wertvoll. Sie schafft Klarheit über die Schwachstellen des Systems und ist damit der erste Schritt zur Optimierung der Reaktionsfähigkeit im Krisenfall. Eine Bewertungsmethode ist die Grundlage für die Einschätzung der Ist-Situation des Systems, stellt einen Bezug zwischen Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft her und ermöglicht auch den Vergleich mit ähnlichen Bahnsystemen.

---

<sup>40</sup> Zolli, A.; Healy, A. M. (2013), S.326



Je resilienter ein Bahnsystem einer Großstörung gegenüber reagiert, desto weniger ist es verwundbar. Ebenso wie Risikofaktoren die Vulnerabilität eines Systems erhöhen, können situationsgerechte Schutzfaktoren, positive Einflussfaktoren auf die Resilienz, die allgemeine Widerstandsfähigkeit des Bahnsystems steigern (siehe Abbildung 6).

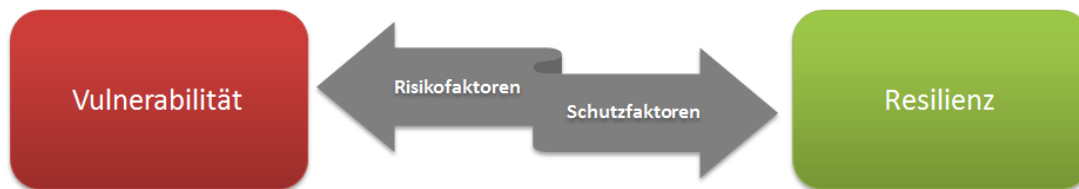


Abbildung 6: Einflussfaktoren auf Vulnerabilität und Resilienz (Quelle: Autorin)

In einem gewissen Maß ist ein Bahnsystem immer vulnerabel. Dies schließt eine Resilienz jedoch nicht aus. „Vulnerabilität und Resilienz sind in diesem Zusammenhang nicht als zwei Seiten einer Medaille zu verstehen. Eine niedrige Verwundbarkeit führt nicht automatisch zu hoher Resilienz. Die beiden Konzepte sind zwar eng miteinander verknüpft, sie verfolgen aber jeweils einer eigenständigen Logik. Die Kenntnis der Vulnerabilität [...] ist gleichzeitig unbedingt notwendig für die Erhöhung der Resilienz.“<sup>41</sup> In diesem Kapitel werden Einflussfaktoren auf die positive Entwicklung von Resilienz untersucht. Anschließend werden KPIs vorgeschlagen, welche diese Einflussfaktoren repräsentieren. Dieses Vorgehen entspringt der Annahme, dass ein Bahnsystem bei Einhaltung aller Resilienzkriterien auch als resilient zu bezeichnen ist. Um die Frage nach Resilienz beantworten zu können, sollten folgende Punkte überprüft werden:

1. Erfüllt das Bahnsystem alle Aspekte der Resilienz-Definition? Dazu gehören:
  - a. Die Vorbereitung auf den Störfall
  - b. Die richtige Reaktion während des Störfalls
  - c. Die Rückkehr in den Ausgangszustand
2. Sind alle Voraussetzungen für den Resilienzyklus vorhanden?

### 3.1 Bewertungsgrößen

Für die Quantifizierung und Operationalisierung der Resilienz eines Bahnsystems wird zunächst festgelegt, welche Kriterien ein geeignetes Bewertungsschema erfüllen muss.

---

<sup>41</sup> Scharte, B.; Thoma, K. (2016), S.137

Folgende Fragestellungen verdeutlichen die Problematik bei der Findung einer Bewertungsmethode.

„Welche Variablen sind wichtig? Mithilfe welcher Indikatoren lassen sie sich operationalisieren? Kann die Resilienz verschiedener Systeme miteinander verglichen werden? Welche Dimensionen müssen integriert und können sie gewichtet werden? Sind qualitative oder quantitative, absolute oder relative Maße sinnvoll? Und wie kann Resilienz als dynamische Eigenschaft mithilfe einer Bewertung oder Messung zu einem bestimmten Zeitpunkt sinnvoll erhoben werden?“<sup>42</sup>

Für die Resilienz eines Bahnsystems können die Fragen umformuliert werden in:

- Welche Variablen beeinflussen die Resilienz des Bahnsystems?
- Können zu jeder dieser Variablen KPIs formuliert werden?
- Sind die KPIs für den Vergleich zweier Bahnsysteme geeignet?
- Gibt es KPIs, die eine größere Aussagekraft über die Resilienz des Bahnsystems besitzen oder andere, die lediglich einzelne Teilaspekte messen können?
- Zu welchem Zeitpunkt sollte gemessen werden?

Im weiteren Verlauf sollen diese Fragen nach und nach beantwortet werden.

### **3.2 Vier Resilienzkriterien und ihre Einflussfaktoren**

Ob ein Bahnsystem einem unerwarteten Zwischenfall standhalten kann, hängt davon ab, welche Rückfallebenen es bereithält und welche Reaktionsoptionen bei Eintritt zur Verfügung stehen. Dieses Repertoire an benötigten Eigenschaften hinsichtlich der Resilienz von kritischen Infrastrukturen beschreiben Tierney und Bruneau<sup>43</sup> sehr treffend. Auch Hahne, welcher sich mit der Resilienz von Städten auseinandergesetzt hat, verfolgte diesen Ansatz.<sup>44</sup>

---

<sup>42</sup> Ebd. S.138

<sup>43</sup> Vgl. Tierney, K.; Bruneau, M. (2007), 09.08.2018

<sup>44</sup> Vgl. Hahne, U. (2013), 17.08.2018

Nachstehende Tabelle zeigt die übereinstimmenden vier Eigenschaften, welche ausschlaggebend für Resilienz sind:









Prof. Dr. Ulf Hahne (Universität Kassel – Institut für urbane Entwicklungen)	Tierney (Direktorin des Forschungszentrum für Naturgefahren, Colorado) und Bruneau (Direktor des multidisziplinären Zentrum für Erdbebenforschung, Buffalo)
 Robustheit  Reaktionsschnelligkeit  Redundanz: Reserven und Ressourcen  Lernfähigkeit	 Robustheit (Robustness)  Verfügbarkeit von Redundanzen (Redundancy)  Ressourceneffektivität (Resourcefulness)  Schnelligkeit (Rapidity)

Abbildung 7: Vier Resilienzeigenschaften

Ressourceneffektivität und Lernfähigkeit meinen dabei das Gleiche: Die Fähigkeit, vorhandene Ressourcen sinnvoll einzusetzen und zugleich die Vorbereitung auf kommende Störungen. Auch Dorbritz und Weidmann basierten ihre Untersuchung, bei welcher die Stabilität eines Schienennetzes analysiert wurde, auf den von Tierney und Bruneau definierten Systemeigenschaften von Resilienz. Allerdings beschränkt sich ihre Analyse auf die Eigenschaften Redundanz und Robustheit, welche beide „*Maße für die Minderung der Systemleistung infolge einer Störung*“<sup>45</sup> sind.

Die vier genannten Eigenschaften von Resilienz dienen gleichzeitig als Kriterien für Resilienz. Die Bewertung der Resilienz eines Bahnsystems bedeutet nunmehr die Überprüfung des Vorhandenseins und der Ausprägung der vier einzelnen Resilienzkriterien:

- Robustheit
- Redundanz: Reserven und Ressourcen
- Ressourceneffektivität
- Reaktionsschnelligkeit

Dabei erfüllen die Resilienzkriterien die Definition der Resilienz eines Bahnsystems folgendermaßen:

1. Für die **Vorbereitung** auf jegliche Störfälle wird die Robustheit des Bahnsystems sichergestellt. Zudem werden bedarfsgerecht Reserven und Ressourcen angelegt.

<sup>45</sup> Dorbritz, R.; Weidmann, U. (2012), S. 218

2. Der Ausbau der Ressourceneffektivität und eine ständige Verbesserung der Reaktionsschnelligkeit ermöglichen eine **richtige und schnelle Reaktion** ab Eintritt einer Störung, sowie ein **Lernen aus der Notsituation** und damit ein **schnelleres Erreichen des Ursprungszustands**.

Fazit: Entscheidend für die Resilienz eines Bahnsystems ist, dass die vier Resilienzkriterien Robustheit, Redundanz, Ressourcenverfügbarkeit und Reaktionsschnelligkeit erfüllt sind. Da eine absolute Erfüllbarkeit nicht gegeben sein kann, gilt: **Je stärker sich die Ausprägung der Kriterien dem Bedarf einer Störungssituation nähern, desto resilienter ist das System.**

In den folgenden Unterkapiteln wird jedes Resilienzkriterium und damit jede Eigenschaft eines resilienten Bahnsystems intensiv beleuchtet. Zunächst wird die Bedeutung des Begriffs erläutert. Dann folgt eine Darstellung möglicher Einflussfaktoren, welche die Ausprägung der Resilienzeigenschaft beeinflussen. Abschließendes Ziel ist es, für die beschriebenen Einflussfaktoren entsprechende KPIs zu formulieren.

### 3.2.1 Robustheit

*“Robustness - the ability of systems, system elements, and other units of analysis to withstand disaster forces without significant degradation or loss of performance”<sup>46</sup>*

Das Resilienzkriterium Robustheit trifft eine Aussage über die Anfälligkeit des Bahnsystems. Je robuster das System, desto weniger anfällig ist es gegenüber Störungen. Entscheidend für die Robustheit ist der Systemzustand: Funktioniert das System auch im Normalzustand einwandfrei? Sind genügend Puffer vorhanden oder ist der Fahrplan, die Strecke, das Personal komplett ausgelastet evtl. sogar überlastet?

Für eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit wird als eines der wichtigsten Ziele von den EIU und EVU größtmögliche Effizienz angestrebt. Diese führt zu einer Ausschöpfung sämtlicher Kapazitäten (Bsp. Eine hohe Infrastrukturauslastung bzw. ein zu dicht getakteter Fahrplan: eine Verspätung zieht Folgeverspätungen nach sich) und lässt damit ebenfalls zu wenig Freiraum für Spontanität. Großstörungen wirken dann gerade deshalb so zerstörerisch, weil sie einen „spontanen“ Charakter haben. Diese Spontanität erschwert selbst eine kurzfristige Vorbereitung auf einen Störfall.

---

<sup>46</sup> Tierney, K.; Bruneau, M. (2007)

Des Weiteren ist die Robustheit eines Bahnsystems nicht lediglich von der Bahn und ihrer Infrastruktur abhängig. Deshalb muss, insbesondere bei der Betrachtung von extremen Wetterereignissen, die weitere Umgebung des Bahnsystems betrachtet werden. Dabei spielen alle Faktoren, die in irgendeiner Weise Einfluss auf die Systemfunktion nehmen können, eine wichtige Rolle.

### **3.2.1.1 Einflussfaktoren auf die Robustheit**

In diesem Unterkapitel werden zunächst Einflussfaktoren auf die Robustheit des Bahnsystems identifiziert. Anschließend erfolgt zu den jeweiligen Faktoren eine Ableitung von KPIs. Die Einflussfaktoren gliedern sich in zwei Bereiche: die äußeren und die inneren Einflussfaktoren.

Folgende Abbildung visualisiert in Grün die äußeren Einflussfaktoren. Blau eingefärbt werden die Einflussfaktoren innerhalb des Bahnsystems dargestellt:

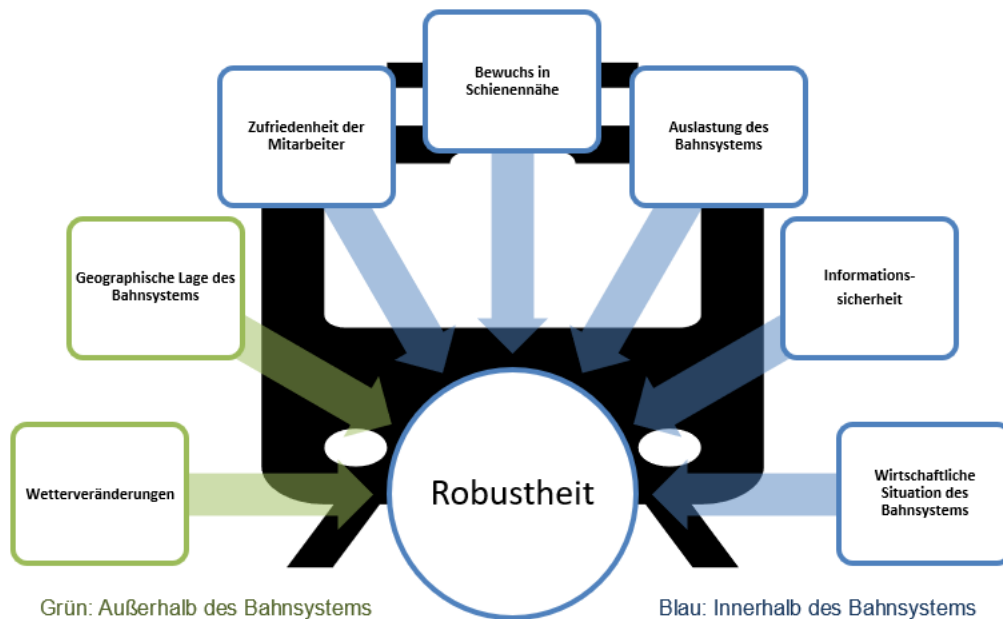


Abbildung 8: Einflussfaktoren auf die Robustheit eines Bahnsystems

Innerhalb des Bahnsystems sind folgende Einflussfaktoren auf die Robustheit zu nennen:

- **Auslastung des Bahnsystems**

Je höher das Bahnsystem ausgelastet ist, desto unflexibler kann es auf kurzfristige Änderungen reagieren. Ein gewisses Maß an Handlungsspielräumen ist daher wesentlich. Die Auslastung des Bahnsystems lässt sich zum einen anhand der KPIs *Auslastung der Infrastruktur* und *Auslastung der Schienenfahrzeuge* beschreiben. Während die *Auslastung der Infrastruktur* bspw. anhand des *verketteten Belegungsgrades*<sup>47</sup> gemessen werden kann, wäre ein möglicher Schlüsselindikator für die Auslastung der Schienenfahrzeuge die jeweilige *Anzahl der beförderten Personen in Relation zu der maximalen Transportmenge*.

- **Wirtschaftliche Situation des Bahnsystems**

Der wirkungsvolle Einsatz finanzieller Mittel erhöht die Robustheit des Bahnsystems. Ein möglicher KPI für die Beurteilung der wirtschaftlichen Situation ist u.a. die *Höhe der bereitgestellten finanziellen Mittel* für sämtliche Maßnahmen der Reduzierung von Anfälligkeiten. Dies gilt jedoch für sämtliche resilienzfördernde Maßnahmen.

<sup>47</sup> Vgl. Pachi, J. (2016), S. 158

- **Zufriedenheit der Mitarbeiter**

Ohne eine kompetente und zuverlässige Mitarbeit des Personals können kurzfristige Maßnahmen nicht umgesetzt werden. Verantwortungsübertragungen, Weiterbildungsangebote, attraktive Vergütung sowie ein angemessenes Urlaubsangebot sind dagegen eine gute Grundlage für die Zufriedenheit der Mitarbeiter. Messbar wird dieser Einflussfaktor beispielsweise mit dem KPI *Auslastung des Personals*.

- **Bewuchs in Schienennähe**

Der Bewuchs in Schienennähe ist ein nicht zu unterschätzender Risikofaktor, welcher insbesondere bei Stürmen (einstürzende Bäume) oder bei Wald- und Böschungsbränden die Robustheit des Bahnsystems negativ beeinflusst. Die KPIs

*Distanz, Höhe und Dichte des Bewuchses in Schienennähe* ermöglichen eine Beurteilung dessen.

- **Informationssicherheit**

In Hinblick auf Cyberangriffe ist ein sicheres Informationssystem eine Voraussetzung für die Robustheit eines Bahnsystems.

Einflussfaktoren außerhalb des Bahnsystems können nur höchst begrenzt abgemildert werden. Die einzige Option ist in den meisten Fällen eine Anpassung an die gegebenen Umweltfaktoren:

- **Wetterveränderungen**

Extremes Wetter, etwa beeinflusst von dem Klimawandel, erfordert eine Anpassung des Bahnsystems. Messbar wird dies bspw. durch die *Häufigkeit auftretender Unwetter, Anstieg der Außentemperatur, Anstieg des Grundwassers*.

- **Geographische Lage des Bahnsystems**

Die Gegebenheiten des Bahnsystem-Umfeldes bieten ebenfalls Risikofaktoren. So gefährden nahliegende Gewässer das Schienensystem im Falle von Überflutung. Ebenso birgt eine Lage im oder am Gebirge die Gefahr von Geröll oder Lawinen. Mögliche KPIs für diesen Aspekt sind die *Nähe zu Gewässern*, an denen Hochwasserschutz erfolgen muss, sowie die *Nähe zu Abhängen*.

Um die Robustheit eines Bahnsystems stärken zu können, müssen Schwachstellen identifiziert und die Systemleistung ermittelt werden. Diese können beispielsweise mithilfe mathematischer Verfahren aus der Netzwerktheorie geprüft werden, in der Bahnhöfe und Haltestellen als Knoten, und die Schienenverkehrswege als Kanten dienen. Durch das Entfernen zufälliger oder ausgewählter Kanten und/oder Knoten, kann eine Aussage über die Stabilität des betrachteten Bahnnetzes getroffen werden.<sup>48</sup>

### 3.2.2 Redundanzen: Reserven und Ressourcen

*“Redundancy - the extent to which systems, system elements, or other units are substitutable, that is, capable of satisfying functional requirements, if significant degradation or loss of functionality occurs.”<sup>49</sup>*

Dieses Resilienzkriterium gibt an, zu welchem Ausmaß ein System über Reserven verfügt, welche bei einem Verlust von wichtigen Systembestandteilen eingesetzt werden können. Auch dies dient der Aufrechterhaltung der Grundfunktionen. Die Verfügbarkeit von Redundanzen trägt zwar auch zur Robustheit des Systems bei. Da die Relevanz von Ressourcen und Reserven jedoch einen so hohen Stellenwert bei der Steigerung von Resilienz einnimmt und die Robustheit abgesehen von den Redundanzen deutlich weitläufiger gefasst ist, wird die Redundanz als eigenständige Resilienzeigenschaft angesehen.

Abgesehen von dem finanziellen und organisatorischen Aufwand von Reserven, hat ein Bahnsystem aufgrund der geographischen Gegebenheiten nur begrenzte Möglichkeiten zur Bereitstellung von Ressourcen. Die Schiene als Verkehrsträger verfügt über andere Kapazitäten und ist nicht so stark vernetzt wie die Straße, was gleichzeitig eine geringe Verfügbarkeit von Ausweichmöglichkeiten im Falle einer Streckensperrung bedeutet.

#### 3.2.2.1 Einflussfaktoren auf die Redundanzen

An erster Stelle ist hier die geographische Lage des Bahnsystems zu nennen. Abhängig von der Vegetation und weiteren geographischen Bedingungen ist bspw. das Anlegen einer Ausweichstrecke mehr oder weniger möglich. Hinzu kommen Aspekte wie die bereits bestehende Bebauung der Systemumgebung. Zu den typischen Ressourcen im Bahnbetrieb gehören u.a. Finanzen, Technologien, Ersatzfahrzeuge, weitere Schieneninfrastruktur, Personal, welches zusätzlich eingestellt werden kann, sowie alternative Verkehrsmittel. Die

---

<sup>48</sup> Vgl. Dorbritz, R.; Weidmann, U. (2012), S. 212 ff.

<sup>49</sup> Tierney, K.; Bruneau, M. (2007)



wichtigsten Einflussfaktoren auf die Redundanzen eines Bahnsystems zeigt nachstehendes Schaubild. Anschließend werden die Einflussfaktoren kurz erläutert und auch hier mögliche KPIs empfohlen. Die KPIs zur Messung von Ressourcen beziehen sich auf den aktuellen Bestand an Ressourcen. Hier geht es darum die Verfügbarkeit der Ressourcen abzubilden.

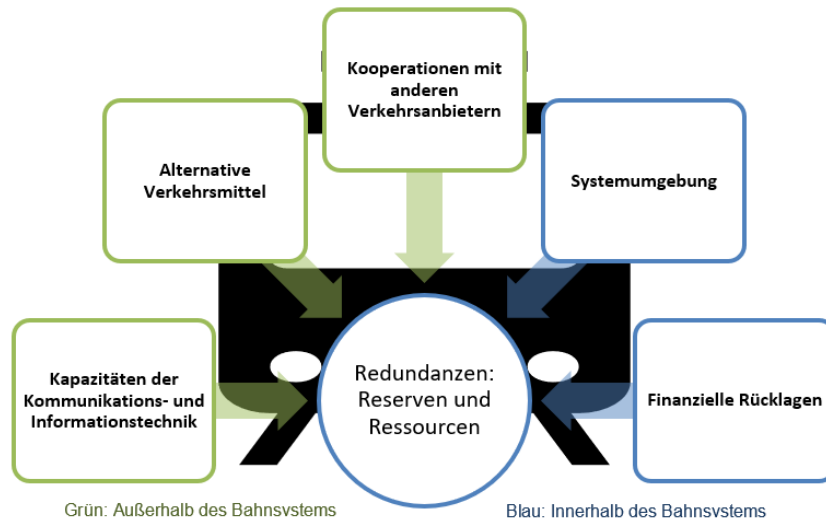


Abbildung 9: Einflussfaktoren auf die Redundanzen eines Bahnsystems

Auch die Resilienzeigenschaft Redundanzen ist zum Teil von äußerlichen Bedingungen abhängig. Auch hier werden dennoch zunächst die Einflussfaktoren innerhalb des Bahnsystems betrachtet:

- **Finanzielle Rücklagen**

Einen großen Einfluss auf die genannten Ressourcen nimmt der finanzielle Aspekt ein. Für Redundanz müssen Gelder dauerhaft aufgebracht werden. Einen Nutzen bringt eine solche Investition jedoch häufig erst im Krisenfall. Die *Höhe der bereitgestellten finanziellen Mittel zur Verwendung für Ressourcen* jeglicher Art ist dabei ein wichtiger KPI. Ebenso hat die Finanzlage einen großen Einfluss auf die *Anzahl der zur Verfügung stehenden Schienenfahrzeuge, Infrastruktur und des verfügbaren Personals*.

- **Systemumgebung**

Handelt es sich um stark befahrene Strecken? Dann sind Ressourcen unabdingbar und müssen unter jeder Bedingung eingeplant werden (siehe Beispiel Rastatt). Je wichtiger die betrachtete Verkehrsstrecke, desto wichtiger sind Rückfallebenen in Form von Redundanzen.

- **Alternative Verkehrsmittel bzw. Absprachen und Kooperationen mit anderen Verkehrsanbietern**

Auch die Zusammenarbeit mit anderen Verkehrsanbietern ist als Redundanz zu bezeichnen. Sie stellt für den Kunden eine Alternative dar und kann dessen Transportbedarf auch bei Ausfall des Bahnbetriebs decken.

- **Kapazitäten der Kommunikations- und Informationstechnik**

Im Störfall müssen Informationen in höherer Geschwindigkeit weitergegeben werden. Zudem steigt die Menge der auszutauschenden Informationen. Um auch im Krisenfall nicht aus Gründen der Überlastung einen Ausfall zu vermeiden, sollten Kapazitäten für den erhöhten Bedarf freigehalten werden.

### 3.2.3 Ressourceneffektivität / Lernfähigkeit

*“Resourcefulness - the ability to diagnose and prioritize problems and to initiate solutions by identifying and mobilizing material, monetary, informational, technological, and human resources”<sup>50</sup>*

Eine Ergänzung zu den zwei Resilienzeigenschaften Robustheit und Redundanzen stellt die Eigenschaft Lernfähigkeit dar. Diese trifft u.a. eine Aussage darüber, ob und in welcher Form Ressourcen genutzt werden. Dabei geht es um Informationen, Finanzen, Technologien, ebenso um Materialien oder Personal. Ressourceneffektivität beschränkt sich jedoch nicht auf den Gebrauch der Ressourcen. Sie beginnt bereits mit der Schwachstellenerkennung, priorisiert diese und setzt Ressourcen, vorhandene und zu dem Zeitpunkt noch fehlende, ein, um die bestehenden Probleme zu lösen.

---

<sup>50</sup> Tierney, K.; Bruneau, M. (2007)

### 3.2.3.1 Einflussfaktoren auf die Ressourceneffektivität

Die Einflussfaktoren auf die Ressourceneffektivität betreffen vor allem das Bahnsystem selbst. Folgende Abbildung stellt einige Einflussfaktoren beispielhaft vor:

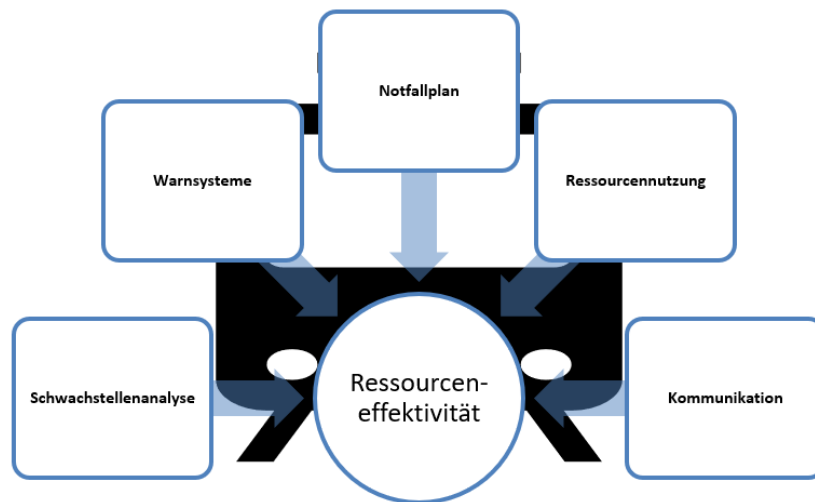


Abbildung 10: Einflussfaktoren auf die Ressourceneffektivität eines Bahnsystems

Die genannten Einflussfaktoren beinhalten folgendes:

- **Schwachstellenanalyse**

In Bezug auf Großstörungen wie Stürme, Überflutungen und Hitzekatastrophen müssen Diagnoseinstrumente vorhanden sein, die ein bevorstehendes Eintreten dieser erkennen, aber auch gleichzeitig die Schwachstellen des Bahnsystems aufdecken, die durch den Eintritt der jeweiligen Störung gefährdet sind. Ein möglicher KPI zur Messung der Qualität der Diagnoseinstrumente wäre hierbei die *Trefferquote der Schwachstellenidentifikationssysteme*

- **Warnsysteme**

Gibt es ein zuverlässiges schnelles Informationssystem, das vor wetterbedingten Einflüssen warnt?

- **Notfallplan**

Gibt es einen Notfallplan für einen derartigen Störfall, der besagt, wo welche Ressourcen in welchem Maß benötigt werden?

- **Ressourcennutzung**

Wie effizient werden vorhandene und aufgestockte Ressourcen im Störfall genutzt? Sind die Vorbereitungsmaßnahmen ausreichend für die Lösung des Problems? Die Ressourcennutzung kann mithilfe folgender KPIs gemessen werden: Der *Anteil der*

*genutzten Fahrzeuge/Ausweichstrecken in Relation zu den zur Verfügung stehenden Fahrzeugen/Ausweichstrecken. Auch das eingesetzte (Reserve-)Personal ist dabei relevant. Eine generelle Einschätzung darüber, ob vorhandene Ressourcen sinnvoll eingesetzt wurden, liefert der KPI *Anzahl beförderter Personen*. Diese werden in Relation zu der Gesamtzahl aller zu befördernden Personen gesetzt. Zu letzterem gehören bspw. alle Personen, die bereits Tickets für eine bestimmte Fahrt gebucht haben.*

- **Kommunikation**

Wie gut ist die Kommunikation zwischen dem Personal und mit den Kunden im Störfall? Hier geht es darum, dass die richtigen Informationen den richtigen Adressaten in der nötigen Schnelligkeit erreichen. Ein möglicher KPI zur Messung dessen ist die *Geschwindigkeit und Güte der Informationsweitergabe im Krisenfall*. Bspw. ist eine Strecke aufgrund einer defekten Oberleitung nicht befahrbar. Innerhalb welcher Zeit können die Reisenden darüber informiert werden? Wird ihnen zudem eine Alternative vorgeschlagen oder sonstige Handlungsanweisung mitgegeben?

### **3.2.4 Reaktionsschnelligkeit**

*“Rapidity - the capacity to restore functionality in a timely way, containing losses and avoiding disruptions”<sup>51</sup>*

Diese Eigenschaft beschreibt den positiven Umgang mit einer Störung mit Fokussierung auf den Zeitfaktor. Übergeordnetes Ziel ist auch hier die Aufrechterhaltung der Funktionalität des Systems und schließlich die Rückkehr in den Ursprungszustand. Die Reaktionsschnelligkeit bezieht sich auf die letzten zwei Resilienz-Phasen „respond“ und „recover“. Nachdem die Grundfunktionalität des Bahnsystems gesichert wurde, wird eine Wiederherstellung des Ursprungszustands angestrebt und durch die Störung angerichtete Schäden ausgeglichen.

---

<sup>51</sup> Tierney, K; Bruneau, M. (2007)

### 3.2.4.1 Einflussfaktoren auf die Reaktionsschnelligkeit

Reaktionsschnelligkeit ist abhängig von jeglichen vorbereitenden und durchzuführenden Maßnahmen und Umgebungsbedingungen während des Störfalls. Folgende, in der nachstehenden Abbildung dargestellten Einflussfaktoren sind hier relevant:

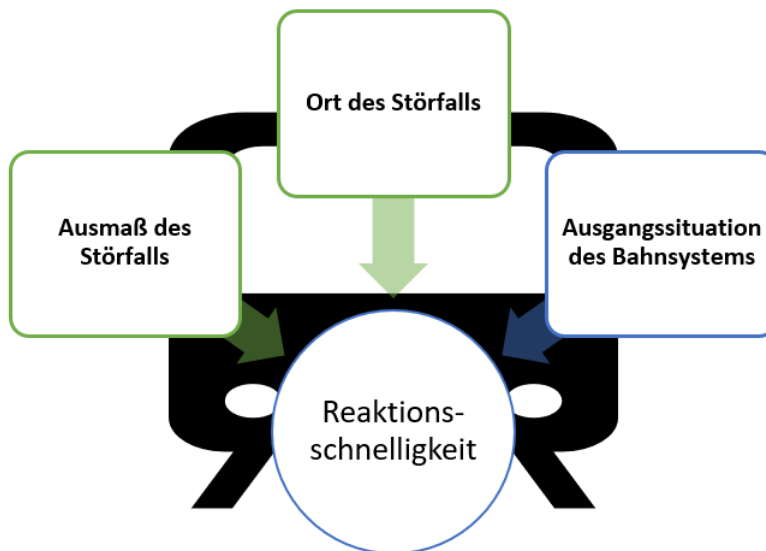


Abbildung 11: Einflussfaktoren auf die Reaktionsschnelligkeit des Bahnsystems

- **Ausmaß der Störung**

Wie lange dauert der Sturm, der Böschungsbrand an? Wie intensiv ist die Zerstörung?

- **Ausgangssituation des Bahnsystems**

In welcher Verfassung befindet sich das betroffene Bahnsystem zum Zeitpunkt des Störungseintritts? Wurde der letzte Sturm noch nicht verkraftet?

- **Ort des Störfalls**

In welcher Region findet der Störfall statt? Urbane Hauptknotenpunkte oder wichtige Güterverkehrsstrecken schränken den Handlungsspielraum ein bzw. erfordern hoch komplexe Vorgänge und Absprachen unter den Akteuren vor Ort.

Die für die Wiederherstellung eines Systems benötigte Zeit ist in vielen Disziplinen eine der wichtigsten Kennzahlen. Im Notfallschutz bspw. beschreibt der Begriff Resilienz allein diese Eigenschaft.<sup>52</sup> Auch für die Bewertung der Resilienz eines Bahnsystems ist dieser KPI ausschlaggebend. Für die Messung der Reaktionsschnelligkeit kann somit folgender KPI herangezogen werden:

---

<sup>52</sup> Vgl. Zolli, A.; Healy, A. M. (2013), S. 16

- ➔ **Zeit, die benötigt wird, nach Eintritt eines Störfalls wieder in den Ursprungszustand zurückzufinden.**

Dies beinhaltet auch die Zeit, die für das Erreichen eines Alternativbetriebs benötigt wurde. Insgesamt gilt: Je schneller das Bahnsystem wieder in den Ausgangszustand zurückfindet (in Relation zum Ausmaß der Störung), desto resilienter ist es.

### 3.3 Ursache-Wirkungsbeziehungen zwischen den Kennzahlen

Resilient ist ein System nur, wenn alle beschriebenen Resilienzeigenschaften vorhanden sind. Einem Bahnsystem, das unendlich viele Ressourcen zur Verfügung hat, diese jedoch nicht effizient nutzt, oder im Vorfeld nicht weiß, dass bestimmte Ressourcen gebraucht werden (durch Diagnoseinstrumente etc.), nutzen diese Ressourcen nichts für eine agile Aufrechterhaltung der Funktionalität im Störfall. Ebenso ist eine Lernfähigkeit ohne Ressourcen nicht möglich.

- ➔ **Die Reaktionsschnelligkeit ist allen Einflussfaktoren und KPIs übergeordnet! Sie ist die Summe aller Einflussfaktoren.**

Die Abhängigkeiten zwischen den Resilienzeigenschaften übertragen sich auf die zugehörigen KPIs. Beispielhaft wird an dieser Stelle die Rolle eines Schienenfahrzeugs auf dem Weg zum resilienten Bahnsystem geschildert:

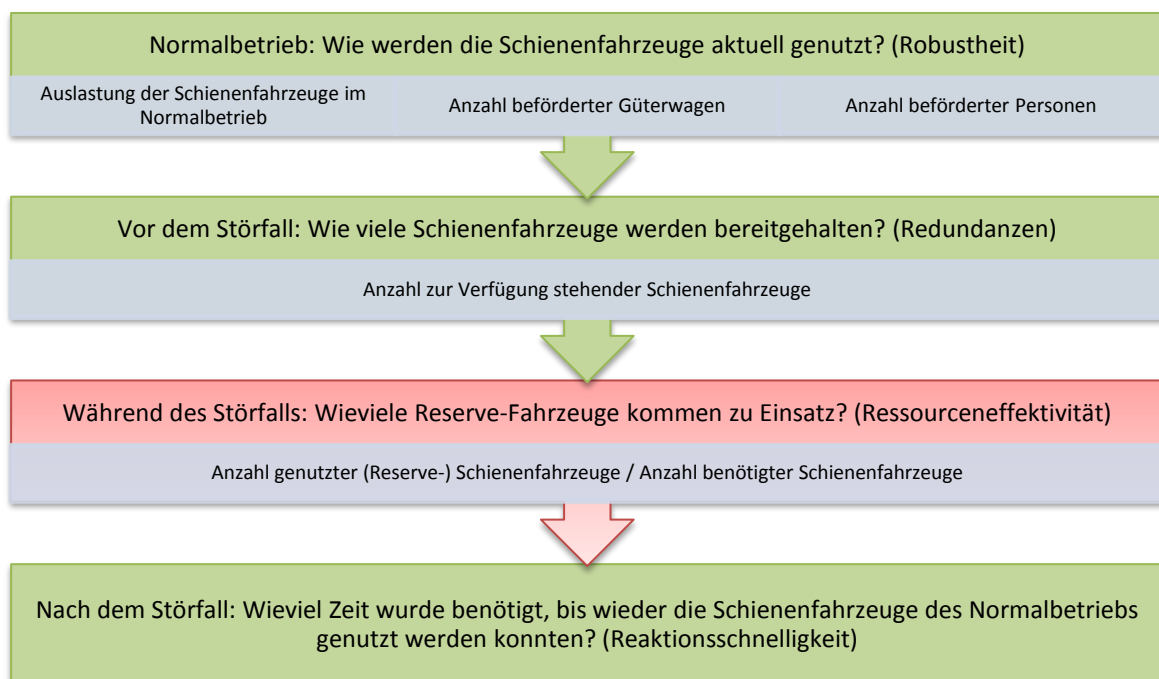


Abbildung 12: KPIs zur Messung des Einsatzes von Schienenfahrzeugen im Bahnsystem

Wie in diesem Beispiel deutlich wird, gibt es Komponenten des Bahnsystems, die den gesamten Resilienzyklus durchlaufen. Die KPIs des einzelnen Messungsobjekts (hier das Schienenfahrzeug) sind dabei auch unabhängig voneinander gültig. Für eine Aussage über die Resilienz des Bahnsystems müssen jedoch die Schlüsselindikatoren jeder Resilienzeigenschaft berücksichtigt werden. Interessant ist dabei die zunehmend detaillierte Betrachtung des einzelnen Betrachtungsobjekts.

Gleichzeitig gibt es Einflussfaktoren auf die Resilienz eines Bahnsystems, die lediglich vorbereitend genutzt werden. Dies betrifft beispielsweise die Vegetationsbedingungen in der näheren Umgebung der Bahninfrastruktur. KPIs wie die Höhe, die Dichte und die Distanz des Bewuchses in Schienennähe betreffen die Phasen der Vorbereitung auf einen Störfall, wie in folgender Abbildung dargestellt:

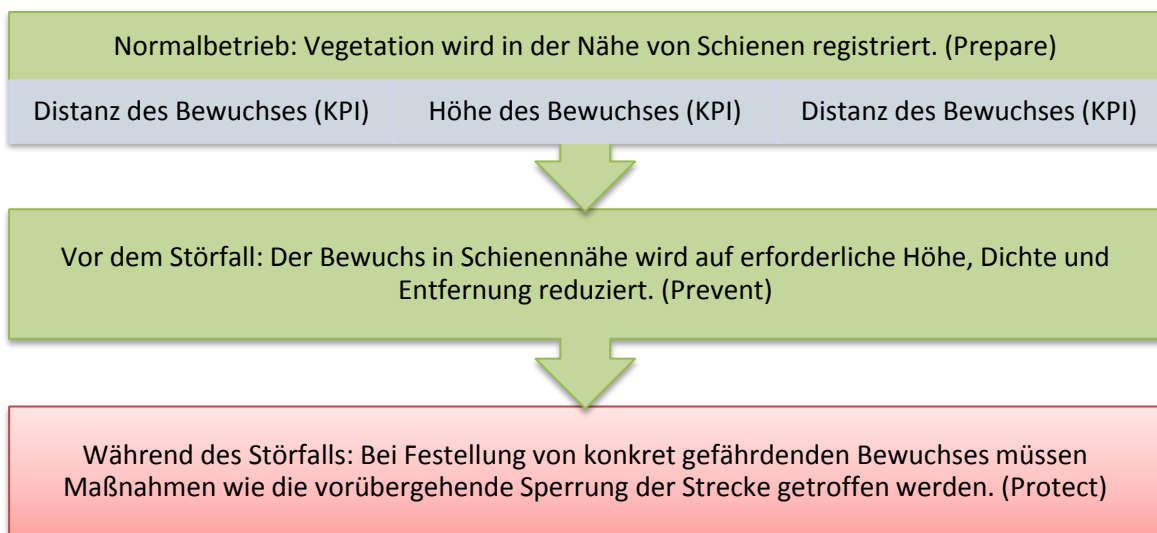


Abbildung 13: Zuordnung der KPIs des Bewuchses in Schienennähe in Bezug zu den Resilienzyklen

Einen Überblick über einige im Rahmen dieser Ausarbeitung definierten KPIs zur Messung von Resilienz eines Bahnsystems soll folgende Abbildung bieten. Sie ordnet die einzelnen KPIs den jeweiligen Resilienzkriterien zu und bildet dabei die Hierarchien dieser ab.

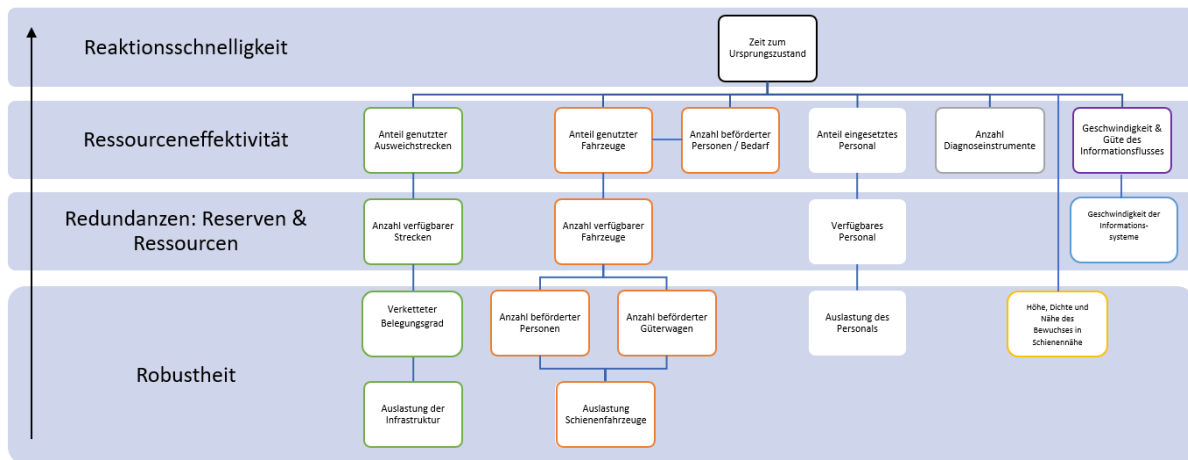


Abbildung 14: KPIs in Bezug zu den Resilienzkriterien

### 3.4 Wie kann die Resilienz eines Bahnsystems erhöht werden?

Zweck einer Bewertung der Resilienz eines Bahnsystems ist letztendlich die Einschätzung der Widerstandsfähigkeit des eigenen Systems, möglicherweise aber auch das Schaffen einer Vergleichsgrundlage für Bahnsysteme untereinander. Eine erste Einschätzung und das „Kennenlernen“ der Resilienzkriterien ermöglichen zudem durch gezielten Einsatz ausgewählter Einflussfaktoren die allgemeine Optimierung der systemeigenen Resilienz. Fällt beispielsweise das Verhältnis der im Störfall genutzten Ausweichstrecken in Relation zu den benötigten Ausweichstrecken nicht optimal aus, so kann als Maßnahme zur Steigerung von Resilienz eine Erweiterung des betreffenden Teilnetzes durch Schaffung von Strecken für Alternativverbindungen im Störfall empfohlen werden.

Auch die Ressourceneffektivität, der Umgang mit den Gegebenheiten in der Störfallsituation kann nach einer Analyse des bisherigen Verhaltens verbessert werden. An dieser Stelle wird der angepasste Umgang der Deutschen Bahn mit den drei Stürmen „Xavier“, „Herwart“ und „Friederike“ erneut als Beispiel herangezogen. Während bei dem ersten Sturm „Xavier“ mit dem Einsatz sämtlicher Reservefahrzeuge versucht wurde, den Fahrbetrieb so gut wie möglich aufrechtzuerhalten, wurde bei den Stürmen „Herwart“ und „Friederike“ der Betrieb zunächst vorsorglich eingestellt. Somit wurde bei letzteren zwei Stürmen eine schnellere Rückkehr in den Ursprungszustand erreicht.

Nachstehende Abbildung stellt eine Übersicht der Eigenschaften eines resilienten Bahnsystems dar. Die Reaktion des Systems wird dabei im Kontext der Resilienz-Phasen und



Resilienz-Einflussfaktoren betrachtet. Farblich eingezeichnet sind zum einen in Blau der Reaktionsverlauf, wenn der Fahrbetrieb für die Dauer der Störung eingestellt wird und zum anderen in roter Farbe der Entwicklungsverlauf des Bahnsystems, wenn unter jeder Bedingung eine Aufrechterhaltung des Fahrbetriebes angestrebt wird. Der Verlauf der blauen Erholungskurve zeigt eine deutlich schnellere Rückkehr in den Ausgangszustand:

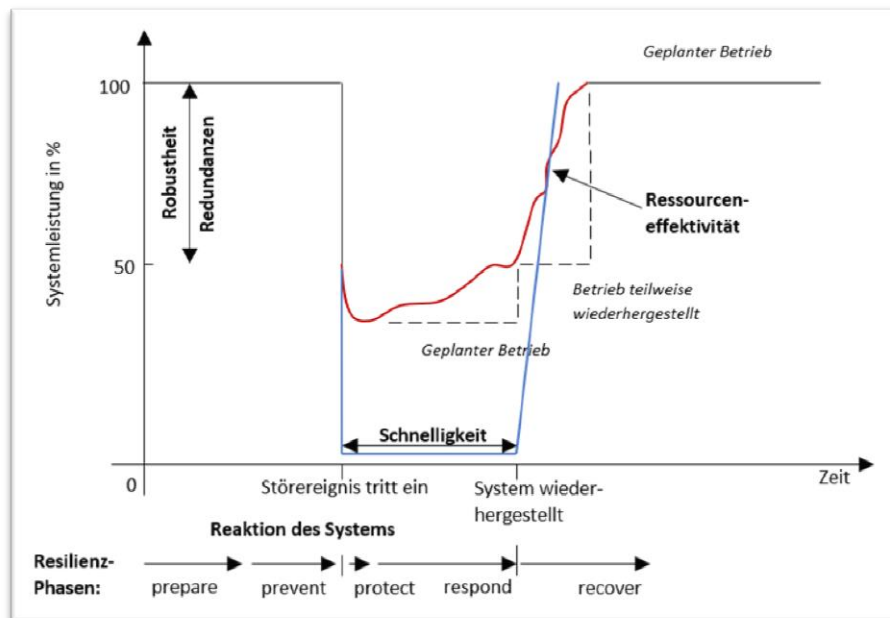


Abbildung 15: Auswirkungen von Störungen auf die Systemleistung und den Bahnbetrieb mit Bezug auf die Resilienzphasen<sup>53</sup>

<sup>53</sup> In Anlehnung an Dorbritz, R., Weidmann, U. (2012), S. 218

## **4 Bewertung der Resilienz anhand von Betriebssimulationen am Beispiel SUMO**

Die im Rahmen dieser Ausarbeitung entwickelten KPIs ermöglichen eine differenzierte Einschätzung der Systemqualitäten in Bezug auf Resilienz. Dabei können einzelne Teilsysteme auch getrennt voneinander betrachtet werden. Dennoch stellt sich die Frage, wie ausgeprägt die Resilienzkriterien eines Bahnsystems sein müssen, um dem kommenden Sturm, der Überflutung oder dem Waldbrand standhalten zu können. Wie lässt sich feststellen, ob die getroffenen Vorbereitungen für einen konkreten Störfall ausreichend sind? Die Antwort darauf sind Simulationen. Das Abbilden von Betriebsszenarien ermöglicht folgendes:

1. Das Ausmaß eines konkreten Störfalls und seine Schadenseinwirkung auf das Bahnsystem können realitätsnah untersucht werden. Wie reagiert das Bahnsystem auf die Sperrung einer bestimmten Strecke?
2. Durch Heranziehen einzelner KPIs können unterschiedliche Bahnsysteme, die vergleichbare Parameter aufweisen, miteinander verglichen werden.
3. Unter Berücksichtigung einzelner KPIs kann zudem eine Maßnahme zur Steigerung eines Resilienzkriteriums auf ihre Wirkung überprüft werden.
4. Betriebssimulationen können dabei helfen, eine Aussage darüber zu treffen, ob einzelne Ressourcen ausreichend verfügbar sind. Hier kann bspw. anhand der zu befördernden Reisenden eine Anzahl von Ersatzfahrzeugen bestimmt werden.

Da eine absolute Bewertung nicht erfolgen kann, stellen vergleichende Simulationen eine praktische und kostengünstige, in vielen Fällen zudem die einzige Möglichkeit dar, das Maß an Resilienz eines Bahnsystems spezifisch und im Kontext eines Störfalls zu bewerten.

### **4.1 Vorstellung geeigneter Simulationssoftware**

Im Rahmen eisenbahnbetriebswirtschaftlicher Untersuchungen werden bereits einige Simulationstools verwendet. Mittlerweile häufig verwendete Tools sind hierbei RailSys, OpenTrack<sup>54</sup> und SUMO. Letzteres wurde vom DLR entwickelt. Alleinstellungsmerkmal von SUMO ist die Möglichkeit der Abbildung verschiedener Verkehrsträger. Somit können

---

<sup>54</sup> Vgl. Scheier, B. (2005), S.12-18

intermodale Reiseketten modelliert und anschließend simuliert werden.<sup>55</sup> Exemplarisch für die Durchführung einer Betriebssimulation zur Bewertung der Resilienz eines Bahnsystems wird im weiteren Verlauf das Vorgehen und die Beschaffenheit eines Modells vorgestellt.

#### **4.1.1 Ein theoretisches Modellbeispiel**

Annahme: In Anlehnung an den Umgang der Deutschen Bahn mit den drei Stürmen „Xavier“, „Herwart“ und „Friederike“ sollen Eisenbahnbetriebssimulationen durchgeführt werden, welche den Effekt der folgenden zwei Handlungsoptionen im Störfall miteinander vergleichen.

- a) Bei Eintritt der Störung (hier des Sturms) wird unter Einsatz aller verfügbaren Ressourcen versucht, den Fahrbetrieb so gut wie möglich aufrecht zu erhalten.
- b) Bei Eintritt der Störung wird der Fahrbetrieb vorsorglich eingestellt, um eine Umverteilung der Schienenfahrzeuge und des Personals zu vermeiden und nach Abebben des Sturms sofort wieder in den Normalbetrieb einsteigen zu können.

Ziel ist es, im Anschluss an die Simulation eine Aussage darüber treffen zu können, welche der beiden Maßnahmen die Resilienz des Bahnsystems mehr fördert. Für das Simulationsmodell werden im Vorfeld folgende Punkte festgelegt:

- **Wie sieht die Ausgangssituation aus?**

Die Ausgangssituation ist gleichzeitig Benchmark für den zu erreichenden Wunschzustand, auch wenn dieser bestenfalls als adäquat zum Regelbetrieb zu bezeichnen ist. Sie bildet die Robustheit des Systems ab: Wie ist der Zustand der betreffenden Infrastruktur? Wie ist die Auslastung der betrachteten Strecken?

- **Welches Teilnetz soll für die Untersuchung abgebildet werden?**

Vorzugsweise ein vielbefahrenes Streckennetz, welches in der Vergangenheit bereits durch Stürme für mehr als 24 Stunden ausgefallen ist.

- **Welcher Störfall soll betrachtet werden?**

Für eine Vergleichbarkeit mit der realen Situation wird in diesem Fall ein Sturm betrachtet.

---

<sup>55</sup> Vgl. Hauck, R. (2018), S.17

#### 4.1.1.1 Beschaffenheit des Modells

Für das Modell wird ein ausgewähltes Streckennetz aus OpenStreetMap (OSM) implementiert. Es werden einzelne Gleise mit den zulässigen Geschwindigkeiten, die Weichenstandorte und die Hauptsignalstandorte abgebildet. Sollen zusätzlich die Passagierströme simuliert werden, so ist dafür eine Implementierung von Bahnsteigen mit entsprechender Länge und Lage im Verkehrsnetz notwendig. Anschließend wird ein Sturm als Störfall inszeniert. Dafür können einzelne Knotenpunkte (Bahnhöfe) oder Kanten (Verbindungsstrecken) manuell in der Simulation gesperrt werden, was eine durch den Sturm verhinderte Nutzungsmöglichkeit der jeweiligen Strecke darstellt.

#### 4.1.1.2 Auswahl eines Teilnetzes des deutschen Schienenverkehrs

Nachstehende Abbildung beinhaltet ein mögliches Streckennetz. Es ist Teil des norddeutschen Fernverkehrsnetzes. Für eine Simulation von Störfällen ist dieses Teilnetz deshalb interessant, weil aufgrund der Küstennähe im norddeutschen Raum häufiger Stürme und Überflutungen auftreten.

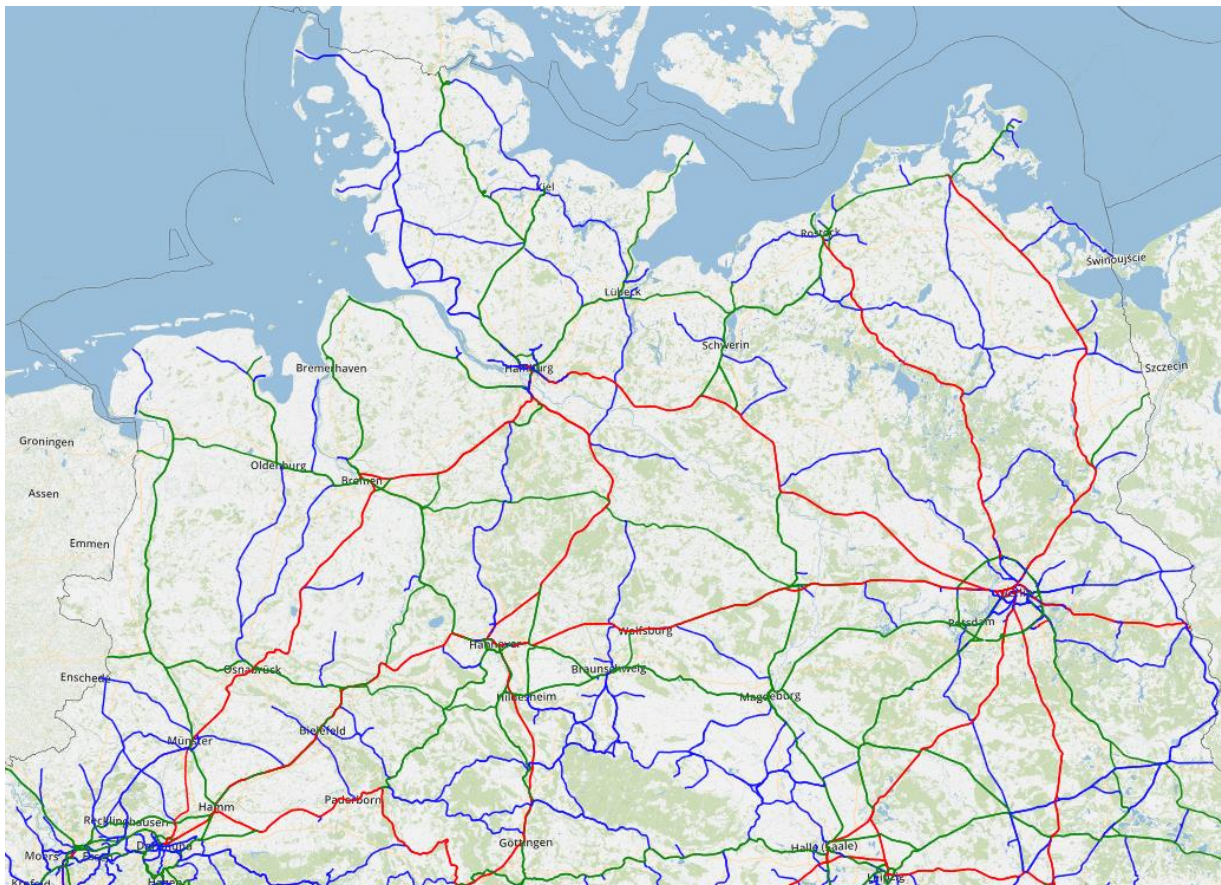


Abbildung 16: Ausschnitt aus dem norddeutschen Streckennetz der Deutschen Bahn

Folgende Strecken, die in Folge des Sturmes Herwart ausgefallen sind, können untersucht werden: Hamburg-Berlin, Osnabrück-Bremen-Hamburg, Hamburg-Westerland, Hamburg-

Kiel, Hamburg-Lübeck-Puttgarden, Hamburg-Rostock-Stralsund sowie Berlin-Stralsund. Zusätzlich können die Strecken Berlin-Wolfsburg und Berlin-Hamburg mit eingebunden werden. Sollte während der Erstellung des Modells die Implementierung einer weiteren Strecke nötig werden, wird diese hinzugefügt. Neben den genannten Strecken können zudem theoretische Schienenverkehrswege simuliert werden, die für mögliche Umleitungen interessant werden könnten.

#### **4.1.1.3 Implementierung der Störung**

Der nächste Schritt ist das Einspielen der Störung und die Nachverfolgung ihrer Auswirkung auf das gesamte Netz. Die Auswirkungen können anhand der vorher ausgewählten KPI gemessen werden. Eine Gesamtaussage über den Erfolg einer Maßnahme liefert folgender KPI: die Zeit, die benötigt wird, um nach Eintritt der Störung wieder in den Normalbetrieb (Ursprungszustand) zu finden. Hiermit wird die Reaktionsschnelligkeit des Bahnsystems in Anbetracht der jeweiligen Reaktionsmaßnahme gemessen.

Zusammenfassend sind folgende Schritte für die Simulation eines Störfalls nötig:

- **Modellierung des Teilnetzes in SUMO**
- **Einspielen einer oder mehrerer Störungen**
- **Messung und Dokumentation der Ergebnisse anhand ausgewählter KPIs**

## **4.2 Bewertung und Auswahl geeigneter KPI für die Modellierung mittels Simulationssoftware**

Anhand der gewählten KPIs sollen Unterschiede zwischen den Betriebsabläufen einer Strecke mit und ohne Störfall messbar werden. Alternativ können verschiedene Bahnsysteme anhand verschiedener KPIs miteinander verglichen werden. Dabei sind Rahmenbedingungen wie das Ausmaß und die Art der Störung, sowie die geographischen Gegebenheiten der Systemumgebung vergleichbar zu halten.

**Fazit:** Ein Schlüsselindikator ist für die Bewertung der Resilienz eines Bahnsystems anhand von Betriebssimulationen dann geeignet, wenn dieser eine Gesamtaussage über die Resilienz des zu untersuchenden Bahnsystems treffen kann und einen Vergleich mit ähnlichen Systemen ermöglicht.

Unter dieser Voraussetzung eignen sich folgende KPIs zur Nutzung im Rahmen von Betriebssimulationen:

- 1. Durchlaufzeit bis zur Erreichung des Ursprungszustands**
- 2. Anzahl beförderter Güter und Personen in Relation zum vor dem Störfall geplanten Transportvolumen**

## 5 Zusammenfassung

Bahnnetze sind kritische Infrastrukturen und bedürfen daher eines besonderen Schutzes vor extremen Wetterereignissen wie den Stürmen „Xavier“ (04.-06.10.2017), „Herwart“ (28./29.10.2017) und „Friederike“ (18./19.01.2018). Da ein Störfallmanagement in den meisten Fällen lediglich auf vorhersehbare Störfälle vorbereitet ist, wird ein neuer Ansatz benötigt, welcher es Bahnsystemen ermöglicht, auch auf plötzliche Störfälle angemessen zu reagieren.

Resilienz ist ein Begriff, der die Widerstandsfähigkeit von Menschen, Städten, Ländern, Einrichtungen und Systemen beschreibt. Unter Berücksichtigung der allgemeinen Grundsätze der Resilienz-Ansatzes gilt für die Resilienz eines Bahnsystems folgende Definition: **Ein Bahnsystem ist resilient, wenn es vorbereitet ist auf unerwartete Ereignisse mit außergewöhnlichen Auswirkungen. Es kann auf diese so reagieren, dass die Grundfunktionen des Systems aufrechterhalten werden können und findet nach einem zuvor definierten Zeitabschnitt wieder in den Ursprungszustand zurück.**

Die Resilienz eines Bahnsystems lässt sich mit vier Resilienzeigenschaften beschreiben, welche auch als Resilienzkriterien betrachtet werden können. Dabei handelt es sich um Robustheit, Redundanzen: Reserven und Ressourcen, Ressourceneffektivität und die Reaktionsschnelligkeit. Je stärker sich die Ausprägungen der Kriterien dem Bedarf einer Störungssituation nähern, desto resilienter ist das System. Verantwortlich dafür sind viele Einflussfaktoren, welche in folgender Abbildung zusammengefasst dargestellt werden:



Abbildung 17: Einflussfaktoren auf die Resilienz eines Bahnsystems

Die Beschreibung der jeweiligen Einflussfaktoren in Form von KPIs lässt eine Bewertung der Resilienz eines Bahnsystems möglich werden. Durch diese Schlüsselindikatoren kann eine Einschätzung der systemeigenen Widerstandsfähigkeit oder ein Vergleich mit ähnlichen Bahnsystemen erfolgen.

Zu den wichtigsten KPIs gehört in diesem Rahmen die *Zeit, in der das Bahnsystem ab Beginn der Störung wieder in seinen Ursprungszustand zurückfindet*. Dieser Indikator bildet die Reaktionsschnelligkeit des Bahnsystems ab. So wie die Reaktionsschnelligkeit auf den anderen Resilienzeigenschaften aufbaut, ist auch der dazugehörige KPI als Ergebnis aller untergeordneten KPIs zu verstehen.

Die Ausprägung der KPIs lässt zudem Rückschlüsse auf erforderliche Maßnahmen zur Steigerung der Resilienz des Bahnsystems zu. So kann bspw. der Einfluss von Neubaustrecken auf die Resilienz mittels Eisenbahnbetriebssimulationen ermittelt werden.

Den Charakter von Resilienz treffen Zolli und Healy sehr genau:

*„Allgemein gesprochen fallen resiliente Systeme auf »elegante« Weise aus – sie verfügen über Strategien, gefährliche Umstände zu vermeiden, Störungen zu erkennen, Schäden an Einzelbestandteilen zu minimieren und zu isolieren, ihren Bedarf an Ressourcen zu diversifizieren, auf Sparflamme zu funktionieren und sich nach einer Störung neu zu organisieren. Solche Systeme sind niemals perfekt, ganz im Gegenteil, denn »perfekte« Systeme sind in der Regel auch am anfälligsten. **Resilienz ist wie das Leben: chaotisch, unvollkommen und ineffizient. Aber sie überdauert.**“<sup>56</sup>*

---

<sup>56</sup> Zolli, A.; Healy, A. - M. (2013), S. 24



## Quellenverzeichnis

- Apel, M. et al. (2017):** Die Eisenbahn als kritische Infrastruktur, in: Eurailpress: Verkehr und Betrieb: Schutz kritischer Infrastrukturen, Heft Nr. 9, (2017), S. 30 - 33
- Bartels, M.; Lorenz, D. F. (2017):** Infrastruktursicherheit als gesellschaftliche Herausforderung: Resilienz und Vulnerabilität von Infrastrukturen ohne Bürger, in: Ökologisches Wirtschaften, (2017), S. 27 - 29
- Dorbritz, R.; Weidmann, U. (2012):** Auswirkungen schwerer Störungen auf Bahnnetze, in: ZEVrail: Infrastruktur, Heft 6-7, (2012), S. 212-225
- Frey, T. (2017):** Ein Jahr nach dem Rheintalfiasco. Deutsche Bahn: "Wir haben aus Rastatt gelernt", <https://www.swr.de/marktcheck/ein-jahr-nach-dem-rheintalbahn-fiasko-deutsche-bahn-wir-haben-aus-rastatt-gelernt-/id=100834/did=22218728/nid=100834/6odpgu/index.html>, Stand: 15.10.2018
- Hahne, U. (2013):** Resilienz, Raum und Steuerung, [https://www.uibk.ac.at/geographie/agef/resilienz/pdf/slides\\_hahne\\_resilienz\\_raum\\_steuerung.pdf](https://www.uibk.ac.at/geographie/agef/resilienz/pdf/slides_hahne_resilienz_raum_steuerung.pdf), Stand: 17.08.2018
- Hauck, R. (2018):** Entwicklung eines Simulationsmodells zur Bewertung der Betriebsqualität - Key Performance Indicators aus Sicht der Reisenden, <https://elib.dlr.de/122105/>, Stand: 30.10.2018
- Hebenstreit, F. et al. (2014):** Hochwasser Juni 2013 - Überflutung einer festen Fahrbahn und deren Folgen, in: Eurailpress: Infrastruktur & Bahn: Feste Fahrbahn, Heft Nr. 3, März 2014, S. 22 - 27
- Heller, J. (2017):** Verband für organisationale Resilienz gegründet, in: wirtschaft&weiterbildung: training und coaching, Heft 11-12, (2017), S.42-44
- Janicke, J. (2011):** Systemwissen Eisenbahn, 1. Auflage, Berlin, 2011
- Lothar3 (2017):** Südportal des Rastatter Tunnels nach dem Gleiseinbruch, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tunnel-S%C3%BCd4.jpg>, Fotografie, Rastatt, 20.08.2017
- Mann, H. - U. (2016):** Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030, Karlsruhe, 2016, S. 96-101

- o. V. (2018a):** Klimastudie: Die Deutsche Bahn muss sich auf Extremwetter einstellen. DB wappnet sich mit 5-Punkte-Strategie,  
[https://www.deutschebahn.com/de/presse/pressestart\\_zentrales\\_uebersicht/Klimastudie--Deutsche-Bahn-muss-sich-auf-Extremwetter-einstellen---DB-wappnet-sich-mit-5-Punkte-Strategie-1440482](https://www.deutschebahn.com/de/presse/pressestart_zentrales_uebersicht/Klimastudie--Deutsche-Bahn-muss-sich-auf-Extremwetter-einstellen---DB-wappnet-sich-mit-5-Punkte-Strategie-1440482), Stand: 15.10.2018
- o.V. (2018b):** Auswirkungen des Klimawandels betreffen die Deutsche Bahn,  
[https://www.deutschebahn.com/resource/blob/1312320/9c6378f4e89265703e4ee7ead8eea9d/Download\\_infografik\\_klimastudie-data.pdf](https://www.deutschebahn.com/resource/blob/1312320/9c6378f4e89265703e4ee7ead8eea9d/Download_infografik_klimastudie-data.pdf), Stand: 22.10.2018
- o. V. (2017):** Beherrschung von Unsicherheit durch Resilienz, [https://www.tu-darmstadt.de/vorbeischauen/aktuell/einzelansicht\\_193216.de.jsp](https://www.tu-darmstadt.de/vorbeischauen/aktuell/einzelansicht_193216.de.jsp), Stand: 19.09.2018
- o. V. (2016):** Rohbau Tunnel Rastatt - Ausbau- und Neubaustrecke Karlsruhe-Basel,  
[https://www.karlsruhe-basel.de/files/page/02\\_aktuelles/06\\_downloads/02\\_tunnel\\_rastatt/Bahn\\_Rohbau\\_Tunnel\\_Rastatt\\_19\\_8\\_16-web.pdf](https://www.karlsruhe-basel.de/files/page/02_aktuelles/06_downloads/02_tunnel_rastatt/Bahn_Rohbau_Tunnel_Rastatt_19_8_16-web.pdf), Stand: 16.08.2018
- o.V. (2014):** Nach Hochwasser überflutete Gleise, in: Hochwasser Juni 2013 - Überflutung einer festen Fahrbahn und deren Folgen, in: Eurailpress: Infrastruktur & Bahn: Feste Fahrbahn, Heft Nr. 3, März 2014, S. 22 - 27
- o. V. (o. J.):** Resiliente Architekturen in der Eisenbahn-Signaltechnik,  
[https://www.seceng.informatik.tu-darmstadt.de/media/seceng/ag\\_cysis/CYSIS\\_RA\\_Whitepaper\\_v2.2.pdf](https://www.seceng.informatik.tu-darmstadt.de/media/seceng/ag_cysis/CYSIS_RA_Whitepaper_v2.2.pdf), Stand: 06.09.2018
- Oetting, A. (2014):** Die Störungen im Griff, in: Eurailpress, Heft Nr.4, 2014, S.16 - 17
- Pachl. J. (2016):** Systemtechnik des Schienenverkehrs: Bahnbetrieb planen, steuern und sichern, 8., überarb. und erw. Aufl., Braunschweig, 2016
- Reuter, R. (2018):** Resiliente Unternehmen? - Widerstandsfähigkeit wurzelt im Individuum, in: GENIOS WirtschaftsWissen, Heft Nr. 03, (2018)
- Roll; E. (2009):** Die Folgen des Klimawandels - Wie muss sich der Schienensektor vorbereiten?, in: ETR: Bahn und Nachhaltigkeit, Heft Nr. 11, November 2009, S. 606
- Sagener, N. (2017):** Sturm "Herwart" - Bahn nennt Sperrungen "bewährtes Konzept",  
<https://www.morgenpost.de/vermishtes/article212395131/Sturm-Herwart-Bahn-nennt-Sperrungen-bewaehrtes-Konzept.html>, Stand: 14.08.2018

**Schachenhofer, U.; Seitz, E. (2017):** Sicher vor Krisen: Neues aus der Resilienzforschung, <https://www.swr.de/swr2/wissen/resilienz/-/id=661224/did=11176318/nid=661224/1xvpn8s/index.html>, Stand: 10.09.2018

**Scharte, B.; Thoma, K. (2016):** Resilienz - Ingenieurwissenschaftliche Perspektive, in: Rüdiger Wink (Hrsg.): Multidisziplinäre Perspektiven der Resilienzforschung, Wiesbaden 2016, S. 123 - 150

**Scheier, B. (2005):** Eisenbetriebssimulationen: Ein Vergleich der Tools *OpenTrack* und *RailSys*, <https://elib.dlr.de/58418/>, Stand: 01.11.2018

**Scheier, B. (2015):** Next Generation Railway System, <https://verkehrsforschung.dlr.de/de/projekte/next-generation-railway-system>, Stand: 18.10.2018

**Schnieder, L. (2018):** Schutz kritischer Infrastrukturen im Nahverkehr: Security Engineering und Security Testing, in: Der Nahverkehr: Betrieb und Infrastruktur, Heft Nr. 4, (2018), S. 19 - 22

**Lobinger, W. (2012):** Auditprozess im Wandel: Die neuen Managementsysteme erfordern neue Ansätze im Auditwesen, in: QZ: Qualität und Zuverlässigkeit: Qualitätsmanagement in Industrie und Dienstleistung, Heft 8, 47. Jahrgang (2012), S. 780 – 781

**Seher, D. (2016):** Das sind die vier Hauptgründe für Verspätungen bei der Bahn, <https://www.derwesten.de/wirtschaft/das-sind-die-vier-hauptgruende-fuer-verspaetungen-bei-der-bahn-id12028139.html>, Stand: 10.10.2018

**Terhaag, O. (2018):** Planung des Unplanbaren. Herausforderung und Ziele, Vortrag der DB Regio AG, Frankfurt am Main, 14.06.2018

**Teuber, S., Dickes, I. (2013):** Neuer Modebegriff anstelle von Stressmanagement, [https://www.bdu.de/media/18805/fachbeitrag\\_resilienz.pdf](https://www.bdu.de/media/18805/fachbeitrag_resilienz.pdf) , Stand: 18.04.18

**Tierney, K.; Bruneau, M. (2007):** Conceptualizing and measuring resilience: A key to disaster loss reduction, TR News, 250 (May-June), S.14-17

**Werner, E.E. / Smith, R.S. (1982):** Vulnerable but invincible. A longitudinal study of resilient children and youth, New York: McGraw- Hill, 1982

**Zolli, A.; Healy, A. M. (2013):** Die fünf Geheimnisse der Überlebenskünstler, 1. Aufl., München, 2013

## **A 1 Anhang**

<b>A 1</b>	<b>Eidesstattliche Erklärung.....</b>	<b>1</b>
------------	---------------------------------------	----------

## **A 2 Eidesstattliche Erklärung**

„Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen verwendet habe.“

Braunschweig, den 16.11.2018

---

Grass, Evnika